

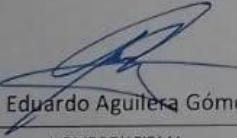
Salamanca, Gto., a 26 de Septiembre del 2016.

M. EN I. J. ANTONIO ALVAREZ JAIME
COORDINADOR DE ASUNTOS ESCOLARES
P R E S E N T E.-

Por medio de la presente, se otorga autorización para proceder a los trámites de impresión, empastado de tesis y titulación al alumno (a) José Augusto Rodríguez Martínez del Programa de Maestría en Ingeniería Mecánica y cuyo número de NUA es: 386832 del cual soy director. El título de la tesis es: Diseño termo-mecánico para pruebas de compresión isotérmicas a altas temperaturas y simulación en ANSYS LS-Dyna

Hago constar que he revisado dicho trabajo y he tenido comunicación con los dos sinodales asignados para la revisión de la tesis, por lo que no hay impedimento alguno para fijar la fecha de examen de titulación.

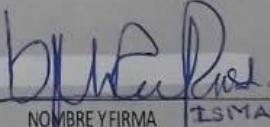
ATENTAMENTE


Dr. Eduardo Aguilera Gómez

NOMBRE Y FIRMA
DIRECTOR DE TESIS
SECRETARIO


Mtro. Guillermo Negrete Romero

NOMBRE Y FIRMA
PRESIDENTE


Ismael Ruiz López

NOMBRE Y FIRMA
DIRECTOR DE TESIS


Dr. Armando Gallegos Muñoz

NOMBRE Y FIRMA
VOCAL



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS IRAPUATO - SALAMANCA

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

" DISEÑO TERMO-MECÁNICO PARA PRUEBAS DE COMPRESIÓN
ISOTÉRMICAS A ALTAS TEMPERATURAS Y SIMULACIÓN EN
ANSYS LS-DYNA"

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

ING. JOSÉ AUGUSTO RODRÍGUEZ MARTÍNEZ

DIRECTORES:

DR. EDUARDO AGUILERA GÓMEZ

M.C. ISMAEL RUIZ LÓPEZ

SALAMANCA, GUANAJUATO

NOVIEMBRE 2016

INDICE

1. Introducción.....	1
1.1. Formado de metal.....	2
1.2. Aspectos generales de los procesos de forja en caliente y tibio.....	3
1.2.1. Antecedentes.....	3
1.2.2. Fundamentos teóricos.....	6
1.3. Metodologías para caracterización termo-mecánica de aceros para forja en caliente.....	11
1.3.1. Introducción.....	11
1.3.2. Fundamentos teóricos.....	12
1.3.3. Monitoreo tecnológico.....	13
1.3.4. Metodología.....	17
1.4. Definición de la geometría de especímenes para caracterización termo-mecánica de curvas de flujo y lubricación.....	21
1.4.1. Antecedentes.....	21
1.4.2. Medidas de las probetas.....	22
1.4.2.1. Probeta con espiral.....	22
1.4.2.2. Probeta Rastegaev.....	24
1.4.2.3. Probeta Tecnalia.....	25
1.4.2.4. Probeta TU Bergakademie Freiberg.....	25
1.4.2.5. Probeta para pruebas de anillo.....	26
1.5. Determinación de los parámetros de prueba para caracterización de curvas de flujo y coeficientes de fricción.....	30
1.5.1. Grado de deformación.....	31
1.5.2. Tasa de deformación.....	32
1.5.3. Temperatura.....	33
1.5.4. Carga requerida para la prueba.....	34
1.5.5. Curvas de flujo de bibliografía.....	35
2. Diseño de plastómetro.....	39
2.1. Antecedentes históricos.....	40

2.2. Conceptualización del sistema para caracterización termo-mecánica.....	42
2.3. Selección de materiales.....	50
2.4. Diseño a detalle de componentes.....	53
3. Simulación de probetas en ANSYS LS-DYNA.....	59
3.1. Método de elemento finito.....	60
3.2. Elementos.....	61
3.3. Análisis por elemento finito.....	65
3.3.1. Construir el modelo.....	65
3.3.2. Revisión de resultados.....	68
3.4. Simulación de probetas de compresión.....	69
3.4.1. Geometría.....	69
3.4.2. Tipos de elementos y constantes reales.....	71
3.4.3. Modelo de material.....	72
3.4.4. Mallado.....	79
3.4.5. Contactos.....	80
3.4.6. Aplicar las cargas al sistema.....	81
4. Análisis de resultados de simulaciones.....	85
4.1. Simulación de probetas 2D.....	87
4.1.1. Temperatura 1000°C.....	87
4.1.1.1. Tasa de deformación de 1/s.....	87
4.1.1.2. Tasa de deformación de 5/s.....	88
4.1.1.3. Tasa de deformación de 15/s.....	89
4.1.1.4. Tasa de deformación de 30/s.....	90
4.1.2.. Temperatura 1100°C.....	91
4.1.2.1. Tasa de deformación de 1/s.....	91
4.1.2.2. Tasa de deformación de 5/s.....	92
4.1.2.3. Tasa de deformación de 15/s.....	93
4.1.2.4. Tasa de deformación de 30/s.....	94
4.1.3. Temperatura 1200°C.....	95
4.1.3.1. Tasa de deformación de 1/s.....	95

4.1.3.2. Tasa de deformación de 5/s.....	93
4.1.3.3. Tasa de deformación de 15/s.....	97
4.1.3.4. Tasa de deformación de 30/s.....	98
4.1.4. Temperatura 1300°C.....	99
4.1.4.1. Tasa de deformación de 1/s.....	99
4.1.4.2. Tasa de deformación de 5/s.....	100
4.1.4.3. Tasa de deformación de 15/s.....	101
4.1.4.4. Tasa de deformación de 30/s.....	102
4.1.5. Sumario de resultados 2D.....	103
4.1. Simulación de probetas 3D.....	105
4.2.1. Temperatura 1000°C.....	105
4.2.1.1. Tasa de deformación de 1/s.....	105
4.2.1.2. Tasa de deformación de 5/s.....	106
4.2.1.3. Tasa de deformación de 15/s.....	107
4.2.1.4. Tasa de deformación de 30/s.....	108
4.2.2.. Temperatura 1100°C.....	109
4.2.2.1. Tasa de deformación de 1/s.....	110
4.2.2.2. Tasa de deformación de 5/s.....	111
4.2.2.3. Tasa de deformación de 15/s.....	112
4.2.2.4. Tasa de deformación de 30/s.....	113
4.2.3. Temperatura 1200°C.....	114
4.2.3.1. Tasa de deformación de 1/s.....	114
4.2.3.2. Tasa de deformación de 5/s.....	115
4.2.3.3. Tasa de deformación de 15/s.....	116
4.2.3.4. Tasa de deformación de 30/s.....	117
4.2.4. Temperatura 1300°C.....	118
4.2.4.1. Tasa de deformación de 1/s.....	118
4.2.4.2. Tasa de deformación de 5/s.....	119
4.2.4.3. Tasa de deformación de 15/s.....	120
4.2.4.4. Tasa de deformación de 30/s.....	121

4.2.5. Sumario de resultados 3D.....	121
5. Fabricación y ensamble de componentes para adaptación de sistema termo-mecánico en prensa YL32-100L.....	124
5.1.Resumen.....	125
5.2.Antecedentes de fabricación.....	125
5.3.Partes en CAD y partes en físico.....	125
5.4.Pruebas de calentamiento de probeta.....	128
6. Conclusiones.....	133
7.- Trabajo a futuro.....	137
8. Bibliografía.....	140

INDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 Diagrama de bloques para el diseño y control de proceso en formado de metal

Figura 1.2. Conjunto de los procesos de producción

Figura 1.3.- Deformación de una pieza cilíndrica en forja abierta

Figura 1.4.- Deformación de una pieza en forja cerrada

Figura 1.5.- Diagrama de fase para Aceros

Figura 1.6.- Diagrama de fase para SAE 1538

Figura 1.7.- Aspereza de algunos procesos de manufactura

Figura 1.8.- Gleeble® 3800

Figura 1.9.- Sistema Uniaxial ZWICK

Figura 1.10.- Prensa para pruebas en OSU

Figura 1.11.- Prensa en el Laboratorio de Forja de OSU

Figura 1.12.- Prensa en el Laboratorio de NCSU

Figura 1.13.- Probeta sometida a prueba de compresión con abarrilamiento

Figura 1.14.- Esquema general de máquina para pruebas de compresión en prensa mecánica

Figura 1.15.- Probeta antes y después de la compresión

Figura 1.16.- Medidas en probeta antes y después de la compresión

Figura 1.17.- a) Antes de la compresión b) *Barreling* al 50% de la reducción

Figura 1.18.- Probeta con espiral

Figura 1.19.- Probeta con espiral después de la deformación

Figura 1.20.- Geometría del espiral en MasterCAM para maquinado en CNC.

Figura 1.21.- Probeta de Rastegaev (mm)

Figura 1.22.- Dimensiones de las probetas en Tecnalia

Figura 1.23.- Dimensiones de las probetas en TU Freiberg (mm)

Figura 1.24.- Esquema del flujo del metal

Figura 1.25.- Ejemplos de los anillos con varias reducciones de altura

Figura 1.26.- Abarrilamiento en pruebas de anillo

Figura 1.27.- Curvas teóricas de calibración para compresión de anillos indicando OD, ID y altura a) 6:3:2 b) 6:3:1 c) 6:3:0.5

Figura 1.28.- Curvas de flujo del acero 15V38 por parte de Tecnalia a tasa de deformación de 15s-1

Figura 1.29 Curva de flujo a tasa de deformación de 0.59s-1

Figura 1.30.- Curva de flujo a tasa de deformación de 1s-1

Figura 1.31.- Curva de flujo a tasa de deformación de 5s-1

Figura 1.32.- Curva de flujo a tasa de deformación de 15s-1

Figura 1.33.- Curva de flujo a tasa de deformación de 30s-1

CAPÍTULO 2

Figura 2.1.- Esquema general para caracterización termo-mecánica

Figura 2.2.- Esquema de dispositivo usado para las pruebas de compresión uniforme

Figura 2.3.- Diseño conceptual del modelo conceptual para forja isotérmica (CATIA®)

Figura 2.4.- Diseño conceptual del modelo conceptual para forja isotérmica (CATIA®) en explosión

Figura 2.5.- Diagrama de fase de Alúmina – Sílice

Figura 2.6.- Calentador tipo RDI de Zircar®

Figura 2.7.- Especificaciones técnicas de prensa TL32-100

Figura 2.8.- Prensa hidráulica YL32-100

Figura 2.9.- Carta Densidad-Resistencia

Figura 2.10.- Módulo de Young – Resistencia a la Fractura

Figura 2.11.- Diseño completo del plastómetro en Catia ®

Figura 2.12.- Diseño del plastómetro para alta temperatura

Figura 2.13.- Plastómetro separado en sus partes

Figura 2.14.- Plastómetro montado en la prensa.

CAPÍTULO 3

Figura 3.1.- Comparación de método implícito y explícito

Figura 3.2.- Puntos de integración en SOLID164

Figura 3.3.- Elemento PLANE162

Figura 3.4.- Elemento SOLID164

Figura 3.5.- Geometría de la simulación 2D

Figura 3.6.- Geometría de la simulación 3D

Figura 3.7.- Unidades del Sistema Internacional en ANSYS

Figura 3.8.- Tipo de elemento para análisis 2D

Figura 3.9.- Tipo de elemento para análisis 3D

Figura 3.10.- Propiedades del modelo de material

Figura 3.11.- Módulo elástico vs Temperatura

Figura 3.12.- Propiedades mecánicas de un modelo de material rígido

Figura 3.13.- Mallado de sistema en 2D

Figura 3.14.- Mallado de sistema en 3D.

Figura 3.15.- Opciones de contacto en ANSYS

Figura 3.16.- Desplazamiento del herramiental superior en 2D

Figura 3.17.- Desplazamiento del herramiental superior en 3D.

Figura 3.18.- Condiciones de restricción para modelo 2D.

Figura 3.19.- Condiciones de restricción para modelo 3D.

CAPÍTULO 4

Figura 4.1.- Patrón de deformación en probeta, a) *barreling* inicial b) *barreling* y *folding* c) Inicio y final de la expansión de la cara

Figura 4.2.- Esfuerzos de Von Mises en 1/s a 1000°C

Figura 4.3.- Coordenadas en X en 1/s a 1000°C

Figura 4.4.- Esfuerzos de Von Mises en 5/s a 1000°C

Figura 4.5.- Coordenadas en X en 5/s a 1000°C

Figura 4.6.- Esfuerzos de Von Mises en 15/s a 1000°C

Figura 4.7.- Coordenadas en X en 15/s a 1000°C

Figura 4.8.- Esfuerzos de Von Mises en 30/s a 1000°C

Figura 4.9.- Coordenadas en X en 30/s a 1000°C

Figura 4.10.- Esfuerzos de Von Mises en 1/s a 1100°C

Figura 4.11.- Coordenadas en X en 1/s a 1100°C

Figura 4.12.- Esfuerzos de Von Mises en 5/s a 1100°C

Figura 4.13.- Coordenadas en X en 5/s a 1100°C

Figura 4.14.- Esfuerzos de Von Mises en 15/s a 1100°C

Figura 4.15.- Coordenadas en X en 15/s a 1100°C

Figura 4.16.- Esfuerzos de Von Mises en 30/s a 1100°C

Figura 4.17.- Coordenadas en X en 30/s a 1100°C

Figura 4.18.- Esfuerzos de Von Mises en 1/s a 1200°C

Figura 4.19.- Coordenadas en X en 1/s a 1200°C

Figura 4.20.- Esfuerzos de Von Mises en 5/s a 1200°C

Figura 4.21.- Coordenadas en X en 5/s a 1200°C

Figura 4.22.- Esfuerzos de Von Mises en 15/s a 1200°C

Figura 4.23.- Coordenadas en X en 15/s a 1200°C

Figura 4.24.- Esfuerzos de Von Mises en 30/s a 1200°C

Figura 4.25.- Coordenadas en X en 30/s a 1200°C

Figura 4.26.- Esfuerzos de Von Mises en 1/s a 1300°C

Figura 4.27.- Coordenadas en X en 1/s a 1300°C

Figura 4.28.- Esfuerzos de Von Mises en 5/s a 1300°C

Figura 4.29.- Coordenadas en X en 5/s a 1300°C

Figura 4.30.- Esfuerzos de Von Mises en 15/s a 1300°C

Figura 4.31.- Coordenadas en X en 15/s a 1300°C

Figura 4.32.- Esfuerzos de Von Mises en 30/s a 1300°C

Figura 4.33.- Coordenadas en X en 30/s a 1300°C

Figura 4.34.- Esfuerzo folding para cada muestra en las condiciones de temperatura y tasa de deformación analizadas con el MEF en el modelo 2D.

Figura 4.35.- Esfuerzo máximo exterior para cada muestra en las condiciones de temperatura y tasa de deformación analizadas con el MEF en el modelo 2D.

Figura 4.36.- Barreling para cada muestra en las condiciones de temperatura y tasa de deformación analizadas con el MEF en el modelo 2D.

Figura 4.37.- Esfuerzos de Von Mises en 1/s a 1000°C

Figura 4.38.- Coordenadas en X en 1/s a 1000°C

Figura 4.39.- Esfuerzos de Von Mises en 5/s a 1000°C

Figura 4.40.- Coordenadas en X en 5/s a 1000°C

Figura 4.41.- Esfuerzos de Von Mises en 15/s a 1000°C

Figura 4.42.- Coordenadas en X en 15/s a 1000°C

Figura 4.43.- Esfuerzos de Von Mises en 30/s a 1000°C

Figura 4.44.- Coordenadas en X en 30/s a 1000°C

Figura 4.45.- Esfuerzos de Von Mises en 1/s a 1100°C

Figura 4.46.- Coordenadas en X en 1/s a 1100°C

Figura 4.47.- Esfuerzos de Von Mises en 5/s a 1100°C

Figura 4.48.- Coordenadas en X en 5/s a 1100°C

Figura 4.49.- Esfuerzos de Von Mises en 15/s a 1100°C

Figura 4.50.- Coordenadas en X en 15/s a 1100°C

Figura 4.51.- Esfuerzos de Von Mises en 30/s a 1100°C

Figura 4.52.- Coordenadas en X en 30/s a 1100°C

Figura 4.53.- Esfuerzos de Von Mises en 1/s a 1200°C

Figura 4.54.- Coordenadas en X en 1/s a 1200°C

Figura 4.55.- Esfuerzos de Von Mises en 5/s a 1200°C

Figura 4.56.- Coordenadas en X en 5/s a 1200°C

Figura 4.57.- Esfuerzos de Von Mises en 15/s a 1200°C.

Figura 4.58.- Coordenadas en X en 15/s a 1200°C

Figura 4.59.- Esfuerzos de Von Mises en 30/s a 1200°C

Figura 4.60.- Coordenadas en X en 30/s a 1200°C

Figura 4.61.- Esfuerzos de Von Mises en 1/s a 1300°C

Figura 4.62.- Coordenadas en X en 1/s a 1300°C

Figura 4.63.- Esfuerzos de Von Mises en 5/s a 1300°C

Figura 4.64.- Coordenadas en X en 5/s a 1300°C

Figura 4.65.- Esfuerzos de Von Mises en 15/s a 1300°C

Figura 4.66.- Coordenadas en X en 15/s a 1300°C

Figura 4.67.- Esfuerzos de Von Mises en 30/s a 1300°C

Figura 4.68.- Coordenadas en X en 30/s a 1300°C

Figura 4.69.- Esfuerzo folding para cada muestra en las condiciones de temperatura y tasa de deformación analizadas con el MEF en el modelo 3D.

Figura 4.70.- Esfuerzo máximo exterior para cada muestra en las condiciones de temperatura y tasa de deformación analizadas con el MEF en el modelo 3D.

Figura 4.71.- Barreling para cada muestra en las condiciones de temperatura y tasa de deformación analizadas con el MEF en el modelo 3D.

CAPÍTULO 5

Figura 5.1.- Instalación de la parte mecánica del plastómetro

Figura 5.2.- Comparativa de sistema en diseño 3D y físico

Figura 5.3.- Sistema de control de potencia

Figura 5.4.- Embobinado para calentamiento de la probeta

Figura 5.5.- Pantalla de sistema de control

Figura 5.6.- Probeta en el proceso de calentamiento

Figura 5.7.- Calentamiento de la parte externa hacia la parte interna de la probeta

Figura 5.8.- Personal de la empresa PEMSA haciendo la medición de la temperatura de la probeta

Figura 5.9.- Probeta fundida por sobre-exposición al inductor

Figura 5.10.- Decarburización de la probeta

Figura 5.11.- Compresión de probeta

Figura 5.12.- Probeta después de la compresión

INDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1

Tabla 1.1.- Valores típicos de temperatura para trabajos en frio, tibio y caliente

Tabla 1.2.- Valor de m para varias condiciones de formado

Tabla 1.3.- Valores C (MPa) y m que describen la relación esfuerzo-deformación

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1.- Características de sensor RVDT y LVDT.

Tabla 2.2.- Relación de variables importantes vs componentes

Tabla 2.3.- Relación pieza-material-proveedor

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1.- Tipos de contactos entre superficies

Tabla 3.2.- Cambio de densidad con respecto a la temperatura

Tabla 3.3.- Cambio de módulo elástico con respecto a la temperatura

Tabla 3.4.- Módulo elástico contra temperatura con respecto a temperatura en condiciones de forja en caliente.

Tabla 3.5.- Coeficiente de Poisson con respecto a la temperatura

Tabla 3.6.- Esfuerzo de cedencia con respecto a 1000°C, 1100°C, 1200°C y 1300°C

Tabla 3.7.- Módulo tangente a 1000°C, 1100°C, 1200°C y 1300°C

Tabla 3.8.- Propiedades mecánicas del TZM

Tabla 3.9.- Tiempos de prueba con respecto a la tasa de deformación

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1.- Propiedades después de la prueba de compresión en 2D

Tabla 4.2.- Propiedades después de la prueba de compresión en 3D

CAPÍTULO 5

Tabla 5.1.- Resultados de pruebas de calentamiento

INTRODUCCION

1. Introducción

1.1. Formado de metal

El proceso denominado como “formado de metal” consiste en un método de manufactura en el cual se posee un material, a partir de materia prima con geometría básica; e.g., un cilindro, bloque o preforma se puede obtener una geometría de mayor complejidad con aplicaciones funcionales; o bien, que requieran procesos adicionales y complementarios para ello, en el proceso no existe pérdida de material.

En la figura 1.1 se observa cuáles son los valores de entrada y las restricciones para la determinación del proceso de la geometría y condición del rendimiento del proceso.

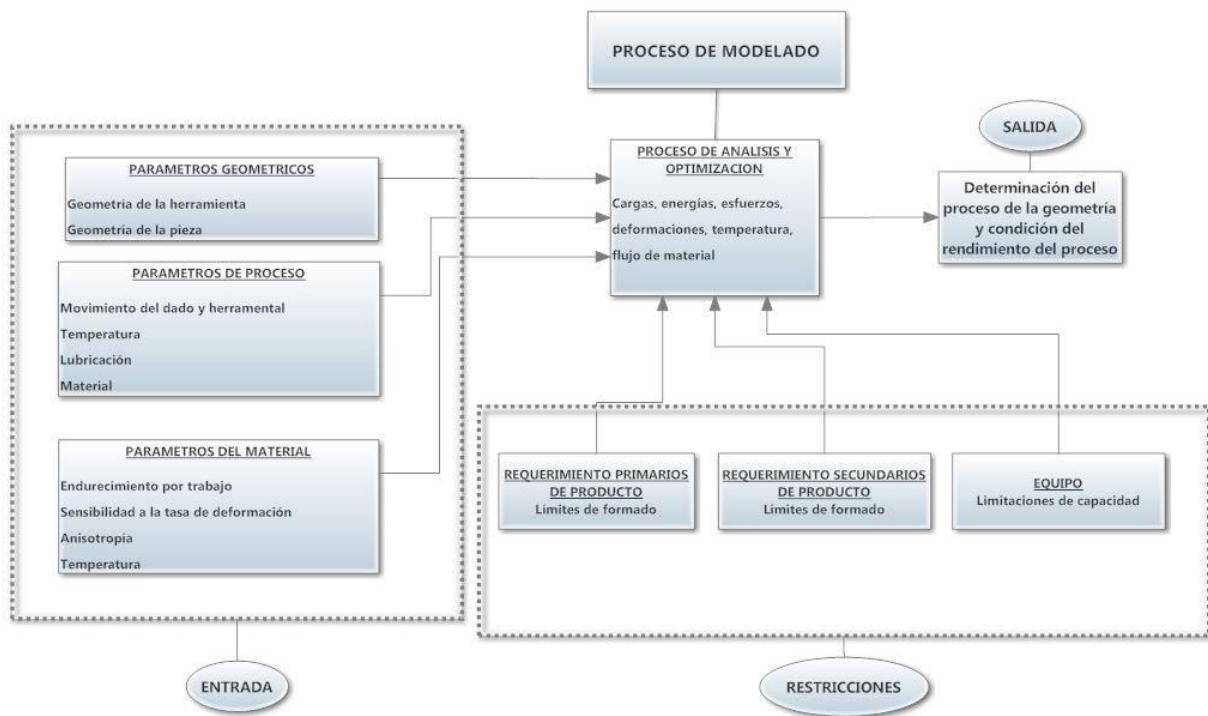


Figura 1.1.- Diagrama de bloques para el diseño y control de proceso en formado de metal [1]

Para la obtención de una geometría compleja, a través del proceso de formado de metal existen tres procesos, los cuales son los siguientes:

1. Formado primario: es el proceso en el cual se obtiene el material que se va a formar, ya sea a través de fundición o prensado de polvo de metal.

2. Formado de metal: proceso en el cual se obtiene la geometría por una deformación plástica, como puede ser la extrusión, forja en fría o caliente, pandeo y embutido.
3. Corte de metal: proceso por el cual a través de una pieza con dimensiones mayores a la geometría deseada, se va desbastando hasta obtener la geometría de la pieza final.
4. Manufactura aditiva: proceso en el cual a través de un inyector de plástico que se mueve sobre una base, va dejando delgados filamentos que forman poco a poco un sólido de plástico.

El proceso de formado de metal se puede dividir en dos grandes áreas, como son:

1. Formado masivo o volumétrico: en el cual se tiene un volumen considerable y son procesos como forjado, moldeado, extrusión.
2. Formado de lámina: en el cual su espesor no es considerado con respecto al área total de la lámina y son procesos como estampado, engargolado, embutido.

1.2 Aspectos generales de los procesos de forja en caliente y en tibio

1.2.1. Antecedentes

El término de forjado se describe en la literatura como la deformación plástica que ocurre en la materia prima, por la acción de un herramiental, para la obtención de una geometría final [2], además de no tener un deterioro de sus propiedades. Este proceso es masivo, por lo que a diferencia del estampado, las geometrías iniciales y finales tienen volúmenes considerables.

Como está descrito en la norma DIN 8580, los procesos de manufactura se definen en seis grupos principalmente: formado, corte, unión, modificación de las propiedades de material y revestimiento, de acuerdo a la figura 1.2. Aunque estos procesos se catalogan de manera independiente hay situaciones en las que no son claramente diferenciables; es decir, hay procesos específicos que además de la condición primaria; i.e., corte, unión, recubrimiento, cambio de propiedades están implícitas condiciones de formado.

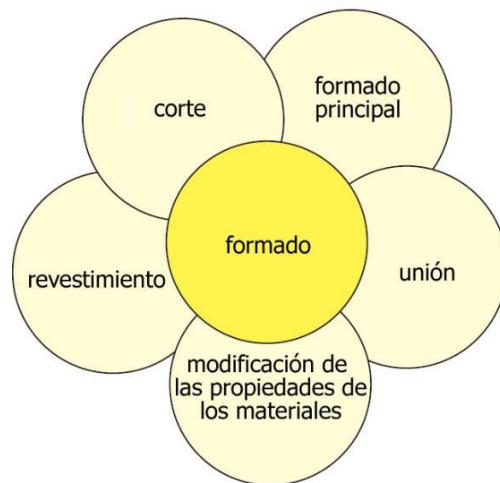


Figura 1.2.- Conjunto de los procesos de producción [3]

Definido por la norma DIN 8580, el formado de metales es la manufactura a través de tres dimensiones o modificación plástica de una forma, siempre y cuando se mantenga la masa y la unión de material. En contraste a la deformación, el formado es la modificación de la forma con una geometría controlada.

Las técnicas para el proceso de formado se clasifican acorde a la norma DIN 8582, esto dependiendo de la dirección a la cual se le aplican los esfuerzos, quedan las siguientes cinco clasificaciones:

- Formado por condiciones de compresión (NORMA DIN 8583)
- Formado por condiciones de compresión y tensión (NORMA DIN 8584)
- Formado por condiciones de tensión (NORMA DIN 8585)
- Formado por pandeo (NORMA DIN 8586)
- Formado por condiciones de cortante (NORMA DIN 8587)

Una vez subclasicadas las condiciones de formado dependiendo de la dirección de esfuerzo, cada una de las subclasicaciones posee una norma DIN diferente. Para cada una de las normas de formado de materiales, existen varios procesos de manufactura que se clasifican de la siguiente manera:

- DIN 8583: rolado, formado con dado abierto, formado con dado cerrado, acuñado y formado por fuerza a través de un orificio.
- DIN 8584: separación de materiales, embutido, doblado, doblado por rotación y abultamiento por arrugas.
- DIN 8585: extensión, expansión y formado por estiramiento.
- DIN 8586: pandeo con movimiento lineal de dado y pandeo con movimiento rotatorio de dado.
- DIN 8587: Desplazamiento y torsión.

El proceso de forjado es claramente uno de los trabajos con metales más antiguo. Desde los días cuando la gente de la prehistoria descubrió que podían calentar el hierro y golpearlo para un uso deseado por medio del martillado contra una piedra. [4]

Este proceso tiene sus inicios en Mesopotamia, alrededor de 4500 A.C., pero tiene sus diferencias con el proceso de forja de hoy en día, ya que inicialmente sólo existía la forja abierta.

Originalmente, el trabajo con metales involucraba un trabajo difícil al manipular la pieza de trabajo a mano con martillos y el uso del calor para ablandar el metal para ser formado en la figura final. Entre los siglos X y XII A.D. los romanos empezaron el uso de agua para mejora del proceso de forja.

Hoy en día la industria de la forja en el siglo XXI se realiza con prensas mecánica-hidráulicas o con martillos alimentados con aire comprimido, electricidad e hidráulicos. El proceso de forjado puede crear partes que son más resistentes que aquellos que fueron realizados con otros procesos de deformación de metales.

La forja moderna es simplemente una extensión de las antiguas prácticas de realizar armas por grandes herreros. Martillos de gran potencia y prensas mecánicas han reemplazado el brazo fuerte y a los martillos, y los dados de acero a los yunque. El conocimiento metalúrgico ha si reemplazado el arte y las habilidades de los artesanos, cuando se busca el control del calentamiento y manejo del material [4], aunque aún sigue siendo un proceso en que la experiencia de quien lo ejecuta es fundamental.

En cuanto al desarrollo teórico de forjado E. Siebel en 1923 escribió un artículo acerca del análisis de forja el asumió un área delgada en donde se define la ecuación de equilibrio. En el caso de compresión de un cilindro de diámetro d y de altura $2h$ consideró que la capa delgada con espesor dx y una altura igual a la del cilindro, y definió el equilibrio de fuerzas actuando en la capa.

Para el caso de esfuerzo de cedencia Y y un coeficiente de fricción μ , derivó un promedio de la presión de contacto \bar{P} como [5], en la ecuación 1.1:

$$\bar{P} = Y \left\{ 1 + \frac{1}{3} \mu \left(\frac{d}{h} \right) \right\} \quad (1.1)$$

Usando más recientes aplicaciones de método de Slab el promedio de la presión es calculado de la siguiente manera [5], en la ecuación 1.2:

$$\bar{P} = 2Y \left(\frac{h}{\mu}\right)^2 \left\{ \exp\left(\frac{\mu d}{2h}\right) - \frac{\mu d}{2h} - 1 \right\} \cong Y \left\{ 1 + \frac{1}{3} \mu \left(\frac{d}{h}\right) \right\} \quad (1.2)$$

La ecuación 1.2 es una aproximación de la ecuación 1.1, cuando $\mu d/h$ es suficientemente pequeño que 1.0. Siebel numéricamente calculó el promedio de las presiones de un caso típico de forja. [5]

H. Kudo (1960) propuso un método para la aplicación del método de cota superior para forja axisimétrica y para extrusión. Dividió el molde axisimétrico en unidades hipotéticas. Y derivó expresiones matemáticas para la velocidad de cada unidad satisfaciendo la condición de volumen constante y el requerimiento de que las velocidades de la superficie sean constantes con las unidades cercanas.

El elemento finito (FEM) desarrollado inicialmente para el análisis de estructuras de aviones en los 50s. En este método, un plato es dividido en muchos elementos hipotéticos, y las ecuaciones de equilibrio en cada punto nodal fueron desarrolladas. Desde que las ecuaciones fueron lineales en términos de desplazamientos nodales, se pudieron resolver con el método de matrices usando computadoras, que comenzaron a ser muy útiles en algunas investigaciones que eran limitadas por este tipo de recursos.

Este método tiene un impacto significante en las investigaciones de plasticidad y no muy tarde artículos de análisis de problemas elástico-plástico del formado de metales empezaron a aparecer.

1.2.2. Fundamentos teóricos

En términos generales, el proceso de forja se puede dividir en 2 tipos [6]:

- Forja abierta: Involucra la compresión de una pieza entre 2 dados planos, las cuales su finalidad es la compresión uniforme del material.
- Forja cerrada: Es la compresión de una pieza entre 2 dados que tienen una geometría en negativo para el formado de la pieza de geometría final compleja.

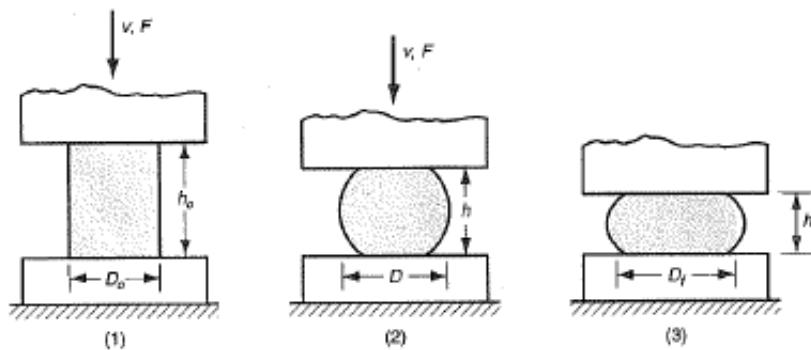


Figura 1.3.- Deformación de una pieza cilíndrica en forja abierta [6]

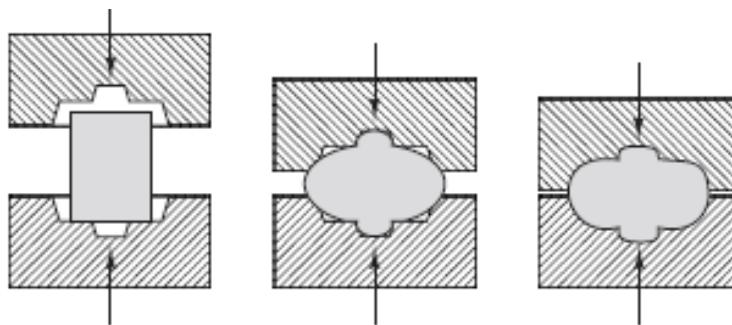


Figura 1.4.- Deformación de una pieza en forja cerrada [7]

Las temperaturas de trabajo de formado de metales se dividen en tres clasificaciones:

- Trabajo en frío: La pieza se encuentra inicialmente a temperatura ambiente.
- Trabajo en tibio: La pieza es calentada arriba de la temperatura ambiente, pero debajo de la temperatura de recristalización.
- Trabajo en caliente: La pieza es calentada por arriba de la temperatura de recristalización.

En el proceso de formado de metales, la deformación plástica y la fricción contribuyen a la generación de calor. Aproximadamente el 90-95% de la energía mecánica implicada en el proceso se transforma en calor. En algunas operaciones de formado como son el embutido y extrusión, realizadas a altas velocidades, se ven implicadas elevaciones de temperatura de cientos de grados Celsius. Las temperaturas generadas en el proceso influyen en las condiciones de lubricación, vida de los herramientales y en las propiedades del producto terminado, y, significativamente, para determinar la máxima velocidad de deformación que puede ser utilizada para la producción de piezas sin tener un excesivo daño en el herramiental [8].

El valor y la distribución de temperaturas dependen principalmente de [9]:

- La temperatura inicial del material y del herramiental.
- La generación de calor durante la deformación plástica y la fricción en la interface de herramiental-material.
- La transferencia de calor entre el material a deformar y los herramientales y entre el material y el medio ambiente (aire o lubricante).

De manera más general, podemos tomar en cuenta la Tabla 1.1, donde se observan los valores típicos de temperatura para trabajo en frío, tibio y caliente, donde T_m es la temperatura de fusión.

TABLA 1.1.- Valores típicos de temperatura para trabajos en frio, tibio y caliente [6].

CATEGORÍA	RANGO DE TEMPERATURA
TRABAJO EN FRÍO	$\leq 0.3T_m$
TRABAJO TIBIO	0.3 T_m - 0.5 T_m
TRABAJO EN CALIENTE	0.5 T_m – 0.75 T_m

La temperatura de recristalización es la temperatura en la que los granos deformados se sustituyen por un nuevo conjunto de granos que forman núcleo y crecen hasta que los granos originales han sido completamente consumidos.

Si observamos el diagrama de fases para aceros al carbono, mostrado en la figura 1.5, podemos visualizar la temperatura de recristalización (A_1), además del cambio de fase de sólido a líquido para el porcentaje de Carbono en el acero.

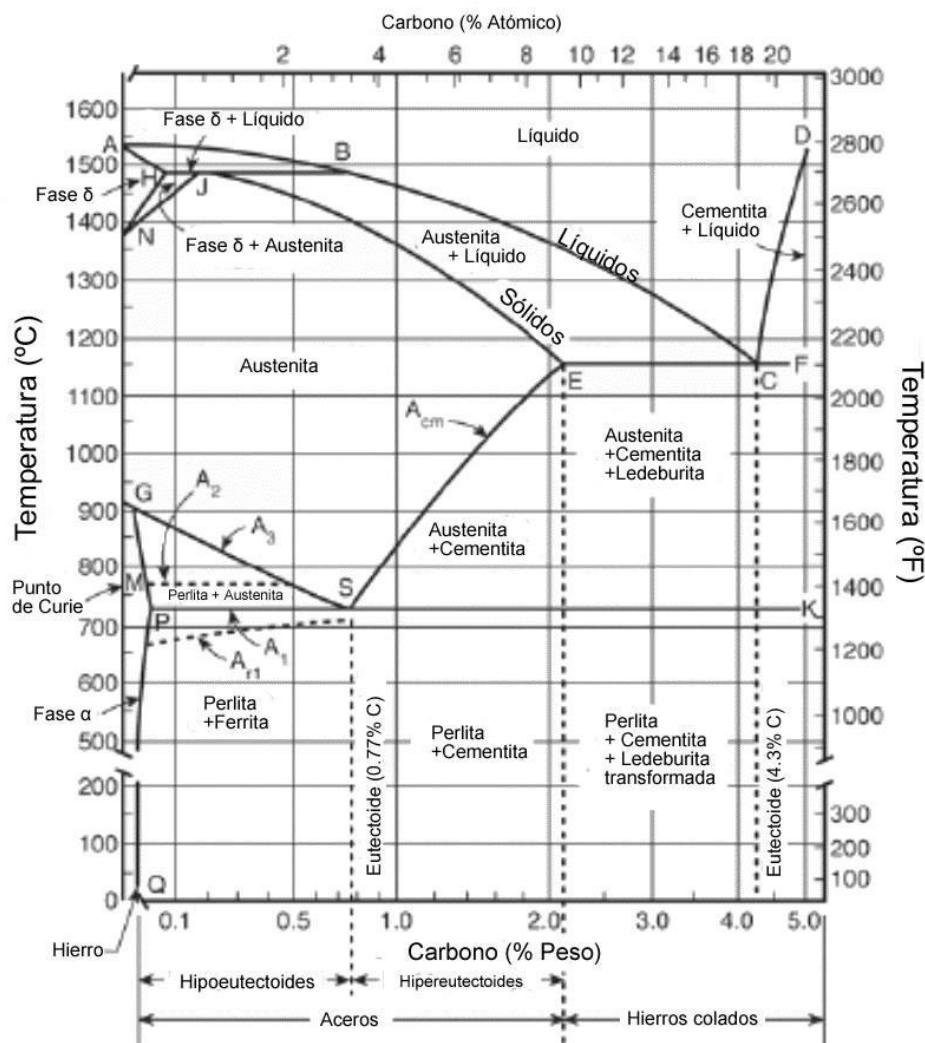


Figura 1.5.- Diagrama de fase para Aceros [10]

En la figura 1.6 se muestra la temperatura de fusión y de recristalización un SAE 1538, el cual tiene un 0.36% de Carbono, los cuales se observa que la temperatura de fusión está por arriba de los 1500 °C y la temperatura de recristalización es aproximadamente 727 °C. Se desea saber estos valores ya que un SAE 1538 será utilizado para el proceso de forja de interés

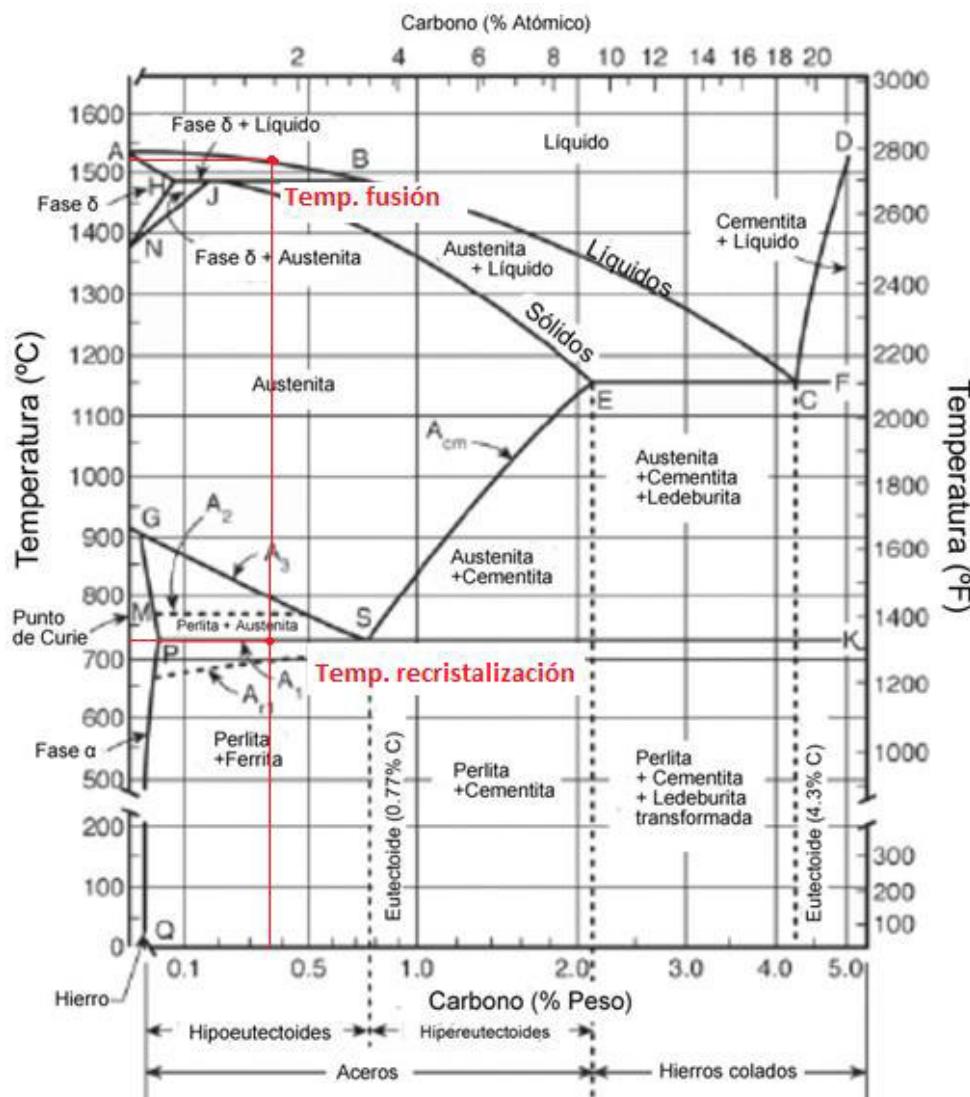


Figura 1.6.- Diagrama de fase para SAE 1538

En cualquier proceso de manufactura existen cuatro características fundamentales [11]:

- Geometría: La forja se limita a geometrías que puedan ser maquinadas en los dados.
- Tolerancias: La exactitud geométrica y dimensional, ver figura 1.7, depende de la exactitud de los dados, complejidad de la pieza, tipo de material, lubricación y el equipo.
- Volumen de producción: La cantidad de piezas producidas por unidad de tiempo determinan la economía del proceso.

- Factores ambientales: a) del aire, agua, suelo y ruido; b) seguridad, psicología y fisiología del ser humano; y c) uso eficiente de recursos materiales y energía.

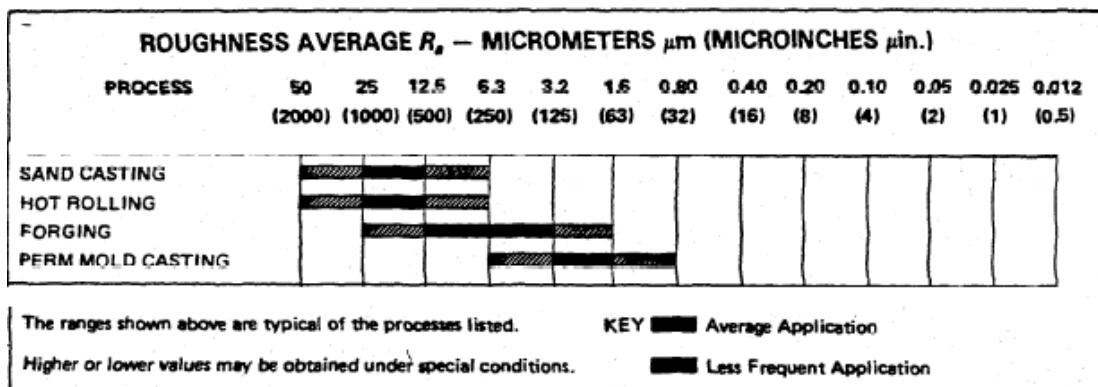


Figura 1.7.- Aspereza de algunos procesos de manufactura [12]

En forja cerrada, un material debe satisfacer dos requerimientos básicos: (a) resistencia del material (o flujo de esfuerzos) debe ser bajo tal que las presiones del troquel se mantengan dentro de las capacidades los materiales factibles para dados y de su construcción, y (b) la capacidad de la deformación del material sin llegar a la falla, que debe permitir la cantidad deseada de deformación.

Estos diferentes metales y aleaciones deben ser forjados a su respectiva temperatura. El forjado del material tiene influencia en el diseño de la forja en sí misma, así como los detalles de todo el proceso de forja [13].

1.3. Metodologías para caracterización termo-mecánica de aceros para forja en caliente

1.3.1. Introducción

Comúnmente cuando se caracterizan las propiedades mecánicas de un metal, se hacen pruebas de tensión, esto debido a que el proceso de formado de láminas de metal conlleva únicamente tensión, siendo la compresión para la parte estética, como arrugas en un estampado; para el proceso de forjado de un material, la caracterización que debe hacerse es a través de pruebas de compresión, por lo que el diseño y fabricación de un sistema de obtención de curvas de esfuerzo-deformación es necesario para caracterizar las propiedades mecánicas del metal.

Actualmente no existe una metodología establecida con norma para poder hacer las pruebas de compresión de aceros, pero en la literatura se han encontrado que la metodología usada por laboratorios de investigación en el área de manufactura, especializados en el área de formado de metales, utilizan la compresión de pequeños cilindros en prensas mecánicas o servo-hidráulicas, las cuales se encuentran instrumentadas. Las pruebas tienen una metodología parecida a las pruebas de tensión, la cual es a través de una celda de carga se va midiendo la fuerza requerida para la deformación de las probetas. En este estudio es muy importante tener en cuenta el que la prueba se hace de manera isotérmica, es por ello que debe calentarse la probeta y el herramiental a la misma temperatura.

La prueba de compresión de cilindros consiste en aplastar un cilindro de metal entre dos placas, las cuales tienen conectadas una celda de carga y un sensor de desplazamiento. Las probetas se comprimen hasta cierta altura conocida y a través de la lectura de datos y su procesamiento en una computadora, se obtienen las gráficas de esfuerzo-deformación de las probetas. Esto sirve para caracterizar un metal a compresión.

La prueba de compresión de anillos consiste en, al igual que las pruebas de compresión de cilindros, aplastar un anillo hasta una altura conocida. La finalidad de esta prueba es conocer el verdadero coeficiente de fricción entre el metal y los herramientales. Se obtiene a través de la lectura de los diámetros interno y externo.

Ambas pruebas se describen con mayor claridad en este capítulo.

1.3.2. Fundamentos Teóricos

En el formado en caliente, la temperatura de los dados normalmente se encuentra por debajo de la temperatura de la pieza de formado. El enfriamiento de los dados influye de manera considerable en las condiciones de fricción entre los dados y las piezas a formar, por lo que en las mediciones se incluye un factor de fricción que se obtiene de las pruebas de anillos a temperaturas de forja en caliente. El enfriamiento influye en la temperatura de la pieza, por lo que influye en el flujo de esfuerzos del material. Es difícil calcular el flujo de esfuerzos actual, $\bar{\sigma}$, el factor de fricción, f , o el factor de cortante, m , bajo condiciones de forja. Una vez que se obtienen esos valores, el esfuerzo cortante, τ , se encuentra dado por la ecuación 1.3 [14]:

$$\tau = f\bar{\sigma} = \frac{m\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \quad (1.3)$$

En pruebas de compresión efectuadas en una prensa, las tasas de deformación varían durante el golpe de deformación ($\dot{\epsilon} = \frac{V}{h}$). De igual manera, para

aplicaciones prácticas los valores promedios de las tasas de deformación pueden ser consideradas aplicando los datos experimentales del flujo de esfuerzos.

1.3.3. MONITOREO TECNOLOGICO

Actualmente en México, se han realizado muy pocas pruebas de obtención de curvas de flujo de deformación por compresión a altas temperaturas. La actual búsqueda del estado del arte permitió encontrar solamente el artículo citado [15]: “Estudio del estado de deformación en aluminio con ensayos de compresión en caliente por el método de elemento finito”.

La realidad es que en el artículo solamente llegan a temperaturas para la poder obtener las curvas de flujo para el aluminio, aunque dichas curvas fueron por arriba de la temperatura de recristalización que es de 350°C. Las pautas de innovación son: pruebas para aceros a elevadas temperaturas, aplicación a la industria automotriz, diseño de un sistema especializado, pruebas isotérmicas (en el proyecto del artículo no son isotérmicas), para los cuales su temperatura de recristalización es 1000°C. Es por ello que los estudios que se han hecho en México, hasta donde se ha investigado, no tienen el alcance de los estudios que se pretenden crear con el proyecto.

Haciendo una búsqueda de las instituciones que poseen lo mínimo requerido para la obtención de las curvas de flujo por compresión a altas temperaturas, podemos observar que muy pocas Universidades lo tienen, encontrando las siguientes instituciones con el equipamiento de la cámara de calentamiento:

- Sheffield University

Cuenta con una máquina para pruebas de compresión termo-mecánica Gleeble® 3800, la cual puede alcanzar temperaturas de hasta 2000°C, siendo esta algo necesario para nuestros análisis. El sistema que cuenta para la adquisición de datos es un sistema de línea, esto quiere decir que el equipo viene fabricado por una empresa. El sistema Gleeble tiene la capacidad térmica de calentamiento de especímenes a una razón de 10,000°C/s. La capacidad mecánica del sistema es de 20 Ton de fuerza estática en compresión y de 10 Ton en tensión. Su velocidad de desplazamiento es a una razón de 2,000mm/s.



Figura 1.8.- Gleebel® 3800 [16]

- Deakin University Australia

Cuenta con la misma máquina que la universidad de Sheffield.

- Atilim Üniversitesi

Cuenta con dos equipos para pruebas de compresión, uno es igual que la Universidad de Sheffield y el otro es un sistema Uniaxial para pruebas de tensión-compresión de marca ZWICK. Posee la capacidad de 30 Ton, con una velocidad de prueba que va de 0.001 – 250 mm/min. Las pruebas pueden hacerse en un rango de temperatura que va desde los 200°C hasta los 1200°C [17].

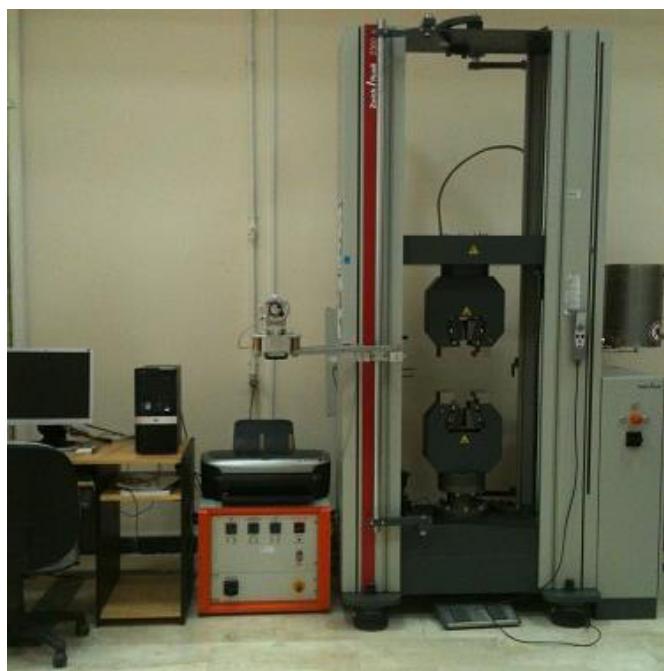


Figura 1.9.- Sistema Uniaxial ZWICK [17]

Además, existen Universidades como Ohio State University (OSU) y North Carolina State University (NCSU), las cuales cuentan con Investigadores que han trabajado con estos métodos, aunque se ha constatado con estos mismos investigadores y visitas a sus laboratorios que actualmente no tiene la infraestructura necesaria para realizarlas.

En la figura 1.10 se muestra un sistema para la obtención de curvas usado en OSU en 2002, la revisión del estado de la técnica actual no permitió encontrar evidencia de que este equipo siga utilizándose para los fines que fue desarrollado en OSU.



Figura 1.10.- Prensa para pruebas en OSU [18]

OSU cuenta con una prensa Obi Niagara A3, ver figura 1.11, con una capacidad de 32 Ton. No se tiene información acerca del sistema de adquisición de datos.



Figura 1.11.- Prensa en el Laboratorio de Forja de OSU [19]

La Universidad de NCSU cuenta con una prensa de 150 TON, con la cual se llegaron a realizar pruebas de compresión aunque actualmente esa aplicación está en desuso para este equipo. No existe información acerca del sistema de adquisición de datos.



Figura 1.12.- Prensa en el Laboratorio de NCSU [20]

Las curvas de flujo pueden obtenerse de diversas condiciones de deformación, en el caso de forja, las pruebas más comunes desarrolladas en laboratorios especializados son la de compresión de cilindros, deformación de aplastamiento plano y la de deformación por torsión; además de, la de compresión de cilindros, aunque no para determinar curvas de flujo sino coeficientes de fricción.

En México no se tiene registro de equipos especializado para la realización de pruebas a altas temperaturas como las mencionadas previamente, por lo que el sistema es novedoso a nivel nacional y con amplia aplicación a nivel industrial. En la región se actualmente presenta un crecimiento acelerado, especialmente el sector automotriz, además de representar un recurso muy valioso a nivel académico para generar conocimiento en el estado del arte y técnica.

1.3.4. Metodología

La revisión en el estado de la técnica ha permitido concluir que las máquinas para la realización de estas pruebas en Inglaterra son principalmente servo-hidráulicas; o bien, hay casos donde se usan actuadores servo-eléctricos. En ambos casos también se emplea un plastómetro. En esta prueba el espécimen debe ser calentado por alguno de los siguientes métodos [14]:

- Radiación en un horno
- Método inductivo
- Por corriente eléctrica AC o DC

Debe cuidarse que los especímenes tengan una deformación de manera uniforme, evitando efectos no deseados de compresión que dan lugar a modos de falla en la deformación como el abarrillamiento (barreling). Este efecto se presenta debido a la fricción creada por la superficie del herramiental y la probeta que limita su expansión en la dirección radial en el plano de contacto; mientras que, en el plano medio de la dirección longitudinal de esta probeta este efecto es mínimo haciendo que dicha expansión sea menor, tal como se observa en la figura 1.13.



Figura 1.13.- Probeta sometida a prueba de compresión con abarrillamiento [14]

Las condiciones para las pruebas de compresión deben estar regidas por los siguientes puntos:

- Las curvas de flujo de los metales deben ser determinadas experimentalmente por la deformación, la relación esfuerzo-deformación y ciertas condiciones de temperatura, las cuales van a existir en el proceso aplicado.
- Las pruebas deben ser isotérmicas, por lo que el herramiental y las probetas deben estar a la misma temperatura.
- El espécimen debe ser comprimido sin abarrilamiento.
- El abarrilamiento se puede disminuir con una lubricación adecuada, por ejemplo con el uso de grafito a altas temperaturas.

El esquema general del sistema de obtención de curvas de esfuerzo-deformación esta mostrado en la figura 1.14, la cual ilustra un sistema para la adquisición de datos en una prensa mecánica. El diseño del sistema sería considerado para su adaptación a una prensa hidráulica dentro del Laboratorio de Manufactura de la División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato.

El trabajo a altas temperaturas, por ejemplo por arriba de la temperatura de recristalización, el flujo de esfuerzo de la mayoría de los metales tiene una dependencia muy grande con respecto a la tasa de deformación.

La velocidad con la cual se hace la compresión debe ser constante durante toda la prueba, por lo que debe instrumentarse la prensa para la obtención de la velocidad durante toda la prueba.

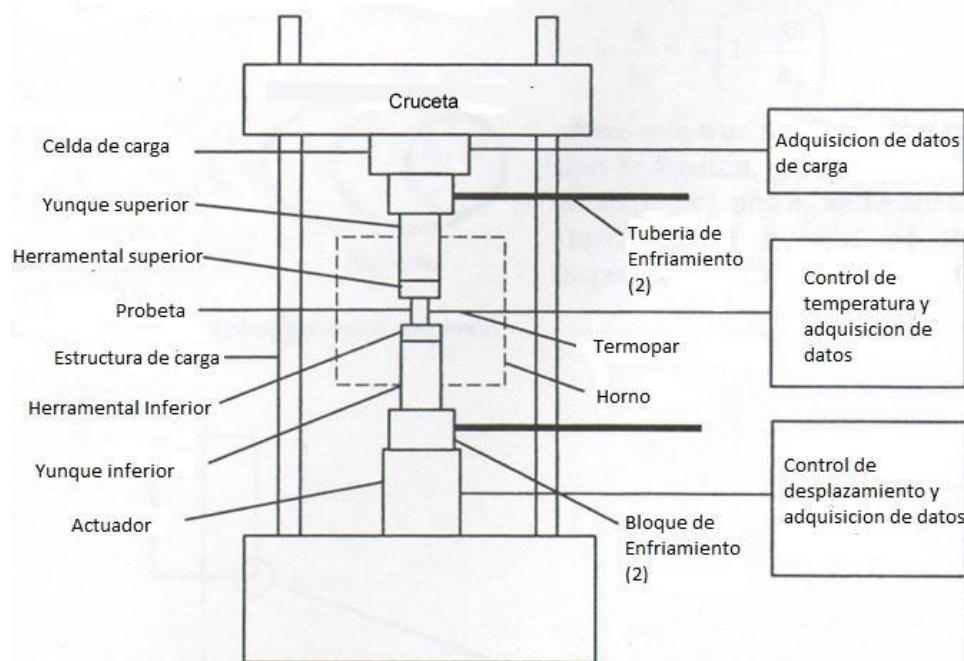


Figura 1.14.- Esquema general de máquina para pruebas de compresión en prensa mecánica [14]

Los pasos a seguir para la obtención de las pruebas de compresión son las siguientes [18]:

1. Obtener la probeta a utilizar.
2. Medir la probeta tanto del diámetro como de la altura.
3. Medir la dureza de la probeta en al menos 3 puntos diferentes.
4. Colocar el herramiental superior a una altura apta para la prueba.
5. Calentar la probeta hasta la temperatura deseada.
6. Colocar la probeta en el herramiental inferior.
7. Deformar la probeta hasta un 30% de su altura inicial.
8. Medir la carga y la dureza en 3 puntos.

Como notas importantes, la probeta debe enfriarse lentamente, debido a que esto puede afectar la dureza de la probeta.



Figura 1.15.- Probeta antes y después de la compresión [19]

La probeta después de las pruebas de compresión tendrá las medidas mostradas en la figura 1.16:

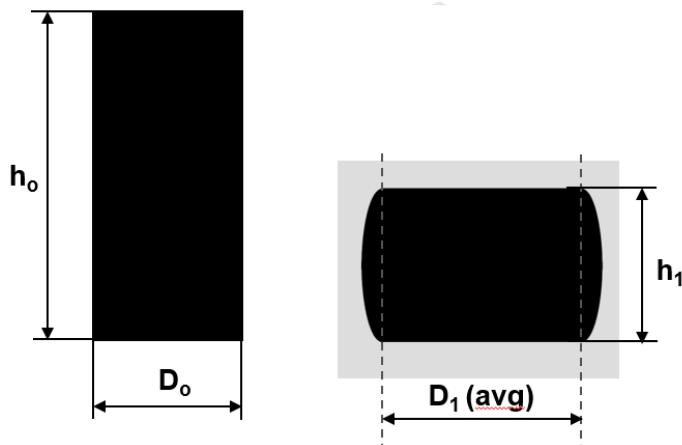


Figura 1.16.- Medidas en probeta antes y después de la compresión [19]

Donde el volumen está dado por:

$$V = \text{volumen de la probeta} = \frac{\pi D_0^2 h}{4}$$

Por lo que el D_1 (promedio) puede ser calculado considerando el volumen constante, la ecuación 1.4:

$$D_1 = \sqrt{\frac{4V}{\pi h}} \quad (1.4)$$

Una vez que se tiene la probeta deformada, debe medirse el *barreling*, el cual está descrito por la ecuación 1.5 [2], ver figura 1.17:

$$\text{Barreling} = H_2 - H_1 \quad (1.5)$$

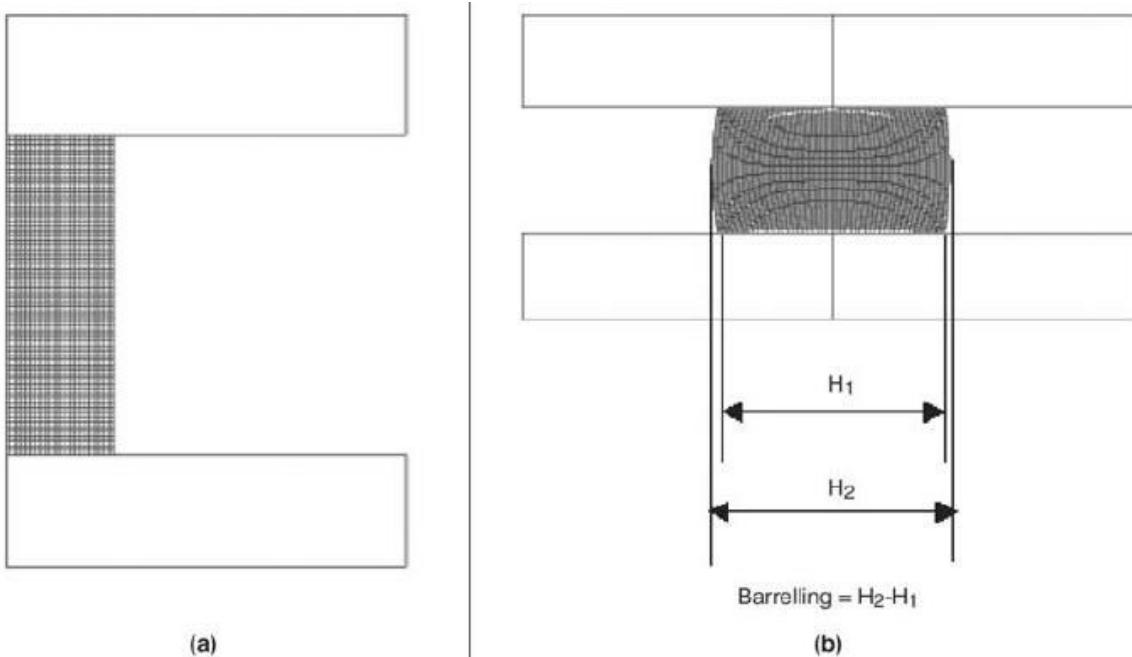


Figura 1.17.- a) Antes de la compresión b) *Barreling* al 50% de la reducción

1.4. Definición de la geometría de especímenes para caracterización termo-mecánica de curvas de flujo y lubricación

1.4.1. Antecedentes

Por parte de los investigadores J. R. Douglas, investigador en metalurgia, y T. Altan, líder investigador del proyecto, se hizo una elaboración de metodología propia para la determinación de flujo y para el coeficiente de fricción. Las pruebas en 1975 se hacían con una probeta de 1in de diámetro por 1.5in de altura [2], además se maquinaba un radio de 0.060in en los bordes de las probetas y se maquinaba un espiral con una profundidad de alrededor de 0.010in de profundidad en cada extremo, esto con la finalidad de atrapar el lubricante y ayudar en la reducción de la fricción.

1.4.2. Medidas de las probetas

1.4.2.1. Probeta con espiral

Al no existir una estandarización de las pruebas en normas, como los es la norma ASTM, DIN y JIS, tal como ocurre con muchos otros métodos como los de tensión, dureza, tenacidad, etc., cada laboratorio tiene su método interno de prueba y sus diseños de especímenes de compresión, así sean desde el diámetro, hasta su longitud. Las probetas, en su mayoría, son cilíndricas y tienen una semejanza de tamaño. Uno de los laboratorios pioneros en la obtención de curvas de flujo es el *Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing* (ERC/NSM) de Ohio, EUA.

Por parte de ERC/NSM, han sido obtenidos datos del artículo “*Flow Stress Determination for Metals at Forging Rates and Temperatures*” de Douglas y Altan en 1975, el tamaño de la probeta para las pruebas de compresión uniformes de 1pulg de diámetro y una altura de $1\frac{1}{2}$ pulg. Se maquina un radio de 0.060pulg en los bordes y un espiral en las superficies de una profundidad de 0.010pulg.

Con el desarrollo de estos métodos se han venido optimizando la geometría de las probetas, de acuerdo a los requerimientos de cada laboratorio en particular, como es en el caso de la probeta del ERC/NSM, debido a que se reporta en el libro de “*Cold and Hot Forging – Fundamentals and Applications*” del Dr. Taylan Altan, se especifican las dimensiones de la probeta usada para las pruebas de compresión, las cuales tienen la mitad de las dimensiones especificadas en el artículo de 1975 de Douglas, por lo que aparenta que la geometría en 30 años fue cambiado por alguna razón y se pueden hacer las pruebas de compresión con las probetas descritas en la Figura 1.18.

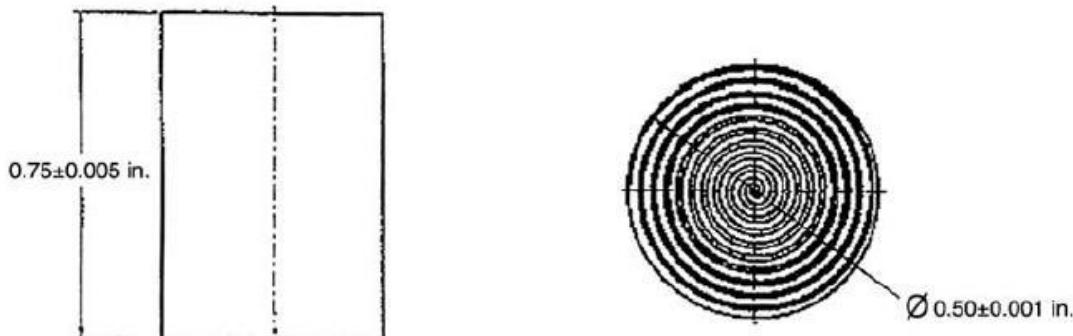


Figura 1.18.- Probeta con espiral [2]

No existe información alguna del número de vueltas del espiral que se requiere, es por ello que se podría manejar de manera libre, pero observando la literatura, se puede observar que hay imágenes de anillos de compresión, así que la forma de saber cuántas vueltas del espiral se requieren es contando, por lo que se observan que son un promedio de 18 vueltas de espiral, ver figura 1.19.



Figura 1.19.- Probeta con espiral después de la deformación [21]

La geometría del maquinado es posible hacerse en el software MasterCAM, por lo que la creación del espiral, el diámetro del herramiental, la velocidad de corte y la profundidad por cada pasada es un caso importante. En la figura 1.20 se observa la geometría en el software MasterCAM.

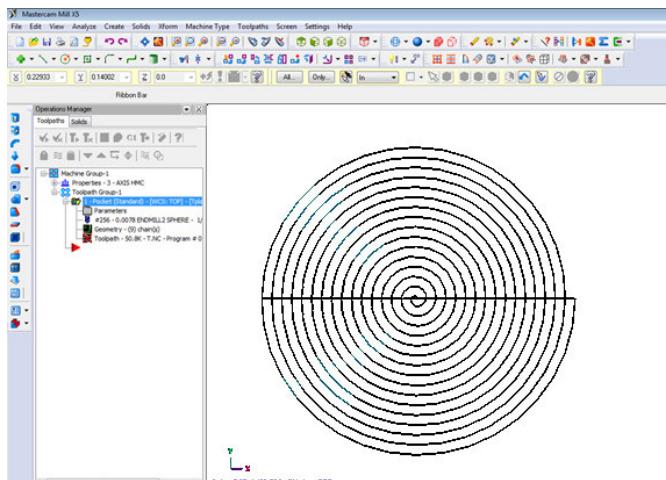


Figura 1.20.- Geometría del espiral en MasterCAM para maquinado en CNC.

1.4.2.2. Probeta Rastegaev

Existe otra probeta que es denominada como la probeta de Rastegaev [22], la cual tiene las mismas dimensiones que de diámetro y alto, pero en los extremos, en lugar de tener un espiral, tiene un maquinado de rebajo en los extremos, como se muestra en la figura 1.21.

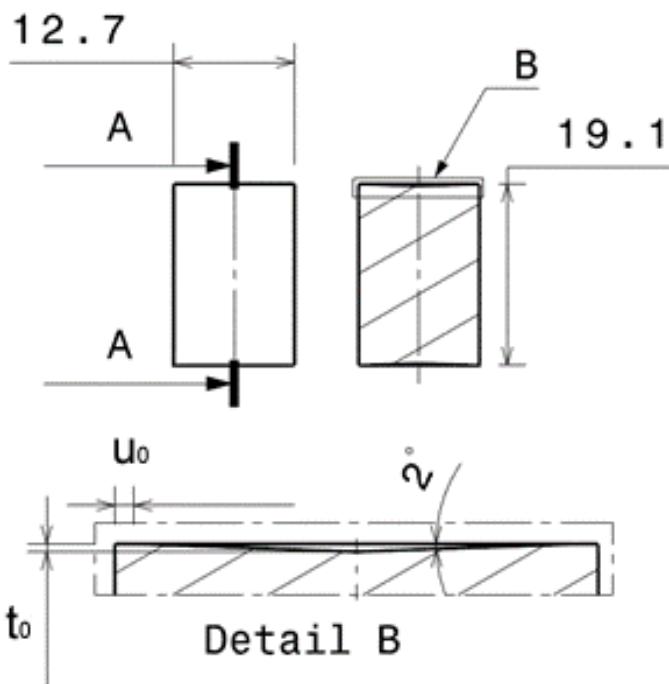


Figura 1.21.- Probeta de Rastegaev (mm) [22]

Las dimensiones de $t_0=0.008\pm0.005$ in y $u_0=0.02\pm0.005$ in en las caras de los extremos, esto debido a que tiene un efecto muy significativo en las condiciones de lubricación.

La probeta de Rastegaev asegura una buena lubricación para deformaciones de ~0.8 hasta 1, por ejemplo la probeta sigue conservando la forma cilíndrica, debido a la presión radial que el lubricante ejerce sobre el anillo.

Una relación que debe cuidarse es $\frac{t_0}{u_0} = 0.4$, esto para aceros; es un valor óptimo al cual la probeta mantiene la forma cilíndrica a la máxima deformación antes de que ocurra un abultamiento.

1.4.2.3. Probeta Tecnalia

La revisión del estado de la técnica permitió obtener el diseño de probetas para pruebas de compresión empleado por el laboratorio Tecnalía en España, siendo sus dimensiones diferentes a las utilizadas por los centros de investigación en EUA. Las dimensiones son mostradas en la figura 1.22.

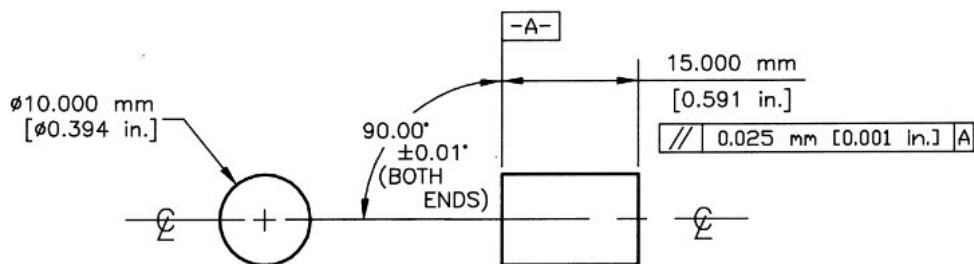


Figura 1.22.- Dimensiones de las probetas en Tecnalía

Como nota, la relación de altura – diámetro es de 1.5, al igual que las probetas en EUA, por lo que debe existir una relación con respecto a las probetas con espiral y Rastegaev, aunque en este caso se especifica que las caras son planas, no teniendo un volumen de lubricación como lo es en los casos de la probeta con espiral y Rastegaev.

1.4.2.4. Probeta TU Bergakademie Freiberg

En el caso de TU Bergakademie Freiberg, no siguen con la relación de 1.5, debido a que estudios internos dentro de sus laboratorios, han encontrado que la relación perfecta para la obtención de curvas de flujo de un acero a alta temperatura es de 1.8, quedando las dimensiones de las probetas con las medidas de la figura 1.23.

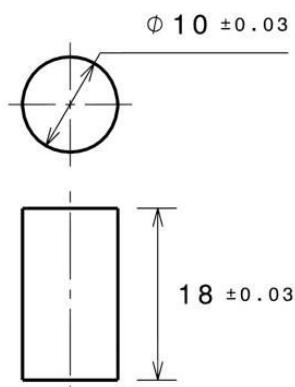


Figura 1.23.- Dimensiones de las probetas en TU Freiberg (mm)

1.4.2.5. Probeta para prueba de anillos

En muchas aplicaciones del formado, la lubricación es uno de los factores más significativos debido a que determina la fricción entre las piezas, lo que se convierte en esfuerzos, cambios en la carga de deformación y en la energía de deformación. Es por ello que se debe evaluar el desempeño de varios lubricantes, es necesario expresar la fricción de manera cuantitativa, en términos de un factor o un coeficiente.

Para las pruebas de lubricación, deben hacerse las pruebas de anillo, esto con el fin de obtener el factor de cortante por fricción del material con respecto al de los herramientales. La prueba de anillo consiste en la compresión de una probeta en forma de anillo plano hasta cierta reducción, como se muestra en la figura 1.24 y 1.25.

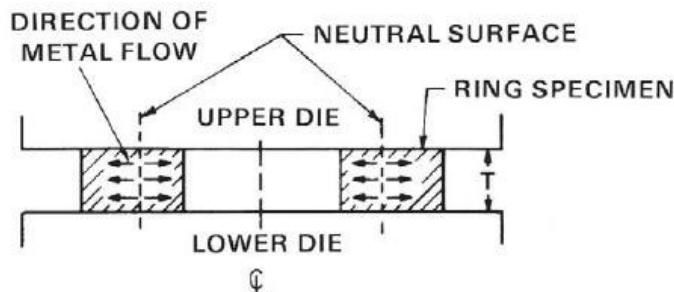


Figura 1.24.- Esquema del flujo del metal [22]



Figura 1.25.- Ejemplos de los anillos con varias reducciones de altura [2]

Los cambios en los diámetros internos y externos del anillo son totalmente dependientes de la fricción existente entre la interfaz de herramiental/probeta [4]. Si la fricción fuera de cero, entonces el anillo tendría una deformación de la misma manera que un disco sólido, donde cada elemento fluye radialmente hacia afuera en una razón proporcional a la distancia del centro. Mientras incrementa la deformación, el diámetro interno del anillo es reducido si la fricción es alta y se incrementa si la fricción es baja.

La prueba de anillo puede utilizarse para cuantificar la fricción en términos del factor de cortante por fricción cortante que se denomina por la ecuación 1.6:

$$m_s = \sqrt{3} \frac{\tau}{\bar{\sigma}} \quad (1.6)$$

Donde τ es el esfuerzo cortante de fricción, $\bar{\sigma}$ es el flujo de esfuerzo del material que se deforma y m es el factor de cortante por fricción [21].

En muchas aplicaciones del formado, la lubricación es uno de los factores más significativos debido a que determina la fricción entre las piezas, lo que se convierte en esfuerzos, cambios en la carga de deformación y en la energía de deformación. Es por ello que se debe evaluar el desempeño de varios lubricantes, es necesario expresar la fricción de manera cuantitativa, en términos de un factor o un coeficiente.

Algunos valores del factor de cortante por fricción pueden observarse en la tabla 1.2.

Tabla 1.2.- Valor de m para varias condiciones de formado [21]

Condiciones de Formado	Factor de cortante por fricción
Formado de aceros en frio, cobre y aleaciones de aluminio con lubricantes de fosfato-jabón	0.05 – 0.15
Formado en caliente de acero, cobre y aleaciones de aluminio con lubricantes de base en grafito	0.2 – 0.4
Formado en caliente de titanio y aleaciones a altas temperaturas con lubricante de vidrio	0.1 – 0.3
Rollado en caliente de plato y extrusiones de aluminio sin lubricantes	0.7 – 1.0

Al igual que en las pruebas de compresión, existe el abarrillamiento en los anillos, esto debido a una fricción mucho mayor a la óptima, como se observa en la figura 1.26.

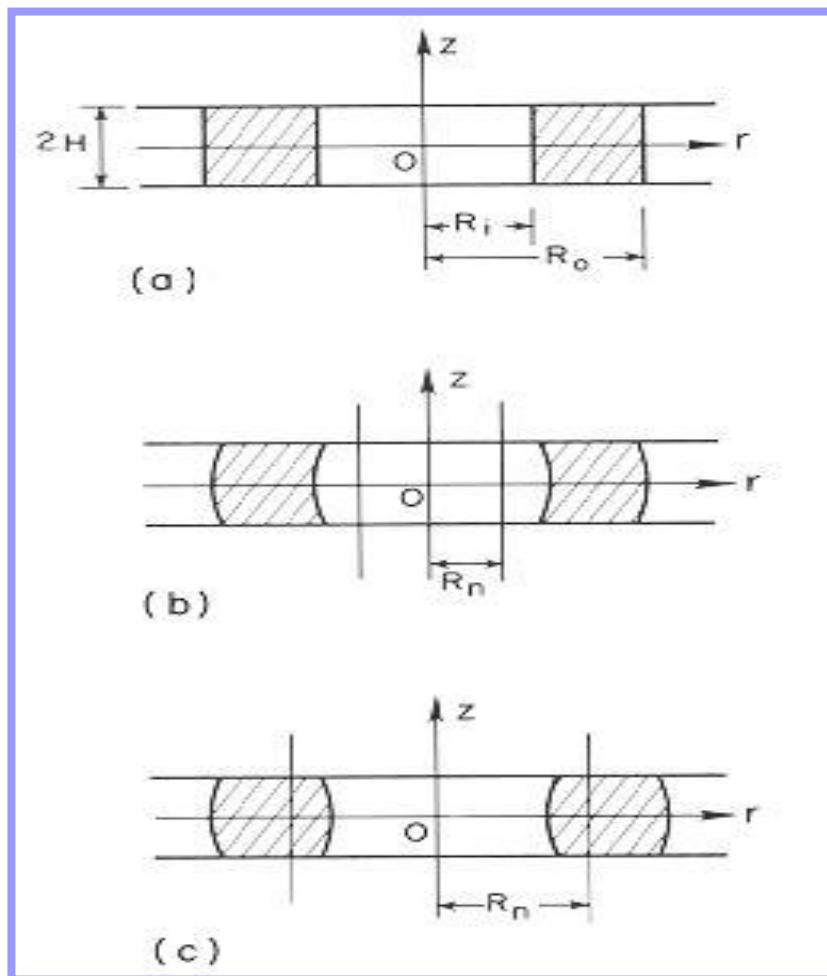


Figura 1.26.- Abarrilamiento en pruebas de anillo [21]

Ya que se ha revisado la razón por la cual se hacen las pruebas de compresión de anillos, se debe definir una geometría para las pruebas de compresión de anillos; al igual que las pruebas de compresión, estas no se encuentran estandarizadas, por lo que observando la bibliografía referida al Dr. Altan, podemos encontrar dos dimensiones diferentes, la primera tiene un OD de 3in y 1.5in de ID con una altura de 1in [23], siendo esta la documentada en los 70's. Las dimensiones de menor antigüedad se encuentran en la presentación en donde usan un OD=60mm, ID=30mm y h=20mm, hasta una reducción del 50%. A diferencia de las probetas, en estas probetas no se encuentra en la bibliografía el uso de espirales para forzar la lubricación siempre. En este caso, se hace sin algún espiral y de tal manera que el lubricante se encuentre en las superficies del anillo.

Una vez que se realizan las pruebas, las dimensiones fueron medidas y el factor cortante por fricción fue determinado por las curvas de calibración, véase Figura 1.27, donde estas curvas se derivan a través de un programa de cómputo,

basados en análisis de métodos de límite superior, que simula la compresión del anillo con abultamiento a fricción constante.

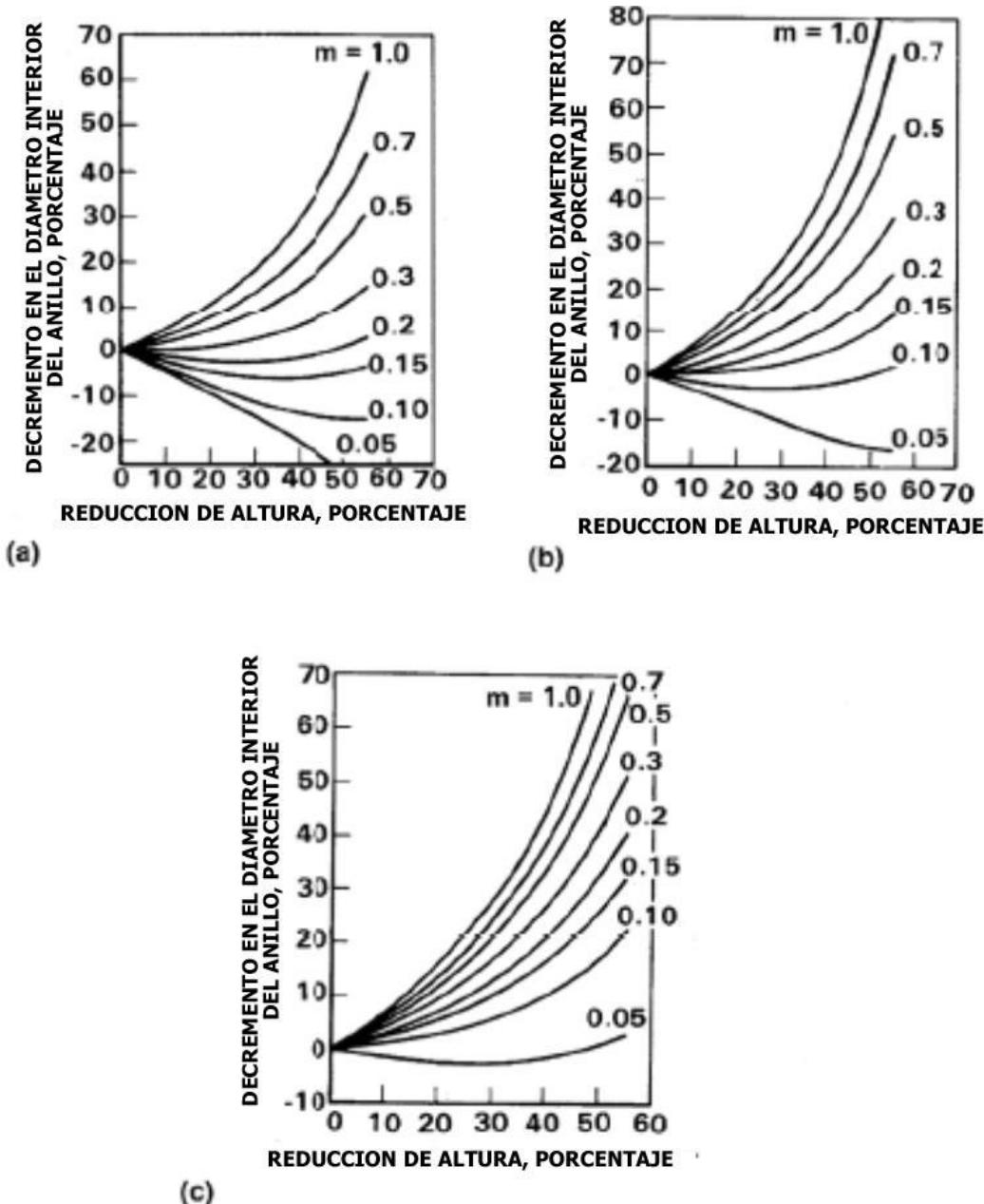


Figura 1.27.- Curvas teóricas de calibración para compresión de anillos indicando OD, ID y altura a) 6:3:2 b) 6:3:1 c) 6:3:0.5 [14]

1.5. Determinación de los parámetros de prueba para caracterización de curvas de flujo y coeficientes de fricción

Para que las pruebas tengan un sentido real a lo necesario en la industria, los parámetros de las pruebas deben estar lo más cercanos posibles a los parámetros a los cuales la industria va a estar trabajando en condiciones óptimas.

El esfuerzo de cedencia de un material bajo condiciones uniaxiales, como una función de deformación, tasa de deformación, y temperatura, puede ser llamado flujo de esfuerzo.

El flujo de esfuerzo $\bar{\sigma}$ es sumamente importante, esto debido a que en el proceso de formado de metal, las cargas de formado y los esfuerzos dependen de tres puntos importantes: geometría de la pieza, fricción y del flujo de esfuerzo del material deformado. El flujo de esfuerzo de un metal está influenciado por:

Factores externos del proceso de deformación, como son la composición química, estructura metalúrgica, fases, tamaño de grano, segregación e historial de deformación.

Factores explícitamente relacionados con el proceso de deformación, como son la temperatura, el grado de deformación y la tasa de deformación.

La caracterización de los aceros a alta temperatura es a través de las curvas de flujo, la cual se expresa como una función de temperatura T , deformación $\bar{\varepsilon}$, tasa de deformación $\dot{\varepsilon}$, y microestructura S , como se muestra en la ecuación 1.7 [9]:

$$\bar{\sigma} = f(T, \bar{\varepsilon}, \dot{\varepsilon}, S) \quad (1.7)$$

Los parámetros que se utilizan son diferentes dependiendo de la temperatura de trabajo, por ejemplo en el trabajo en caliente de metales, por arriba de la temperatura de recristalización, la influencia de la deformación en las curvas de flujo es insignificante, y la influencia de la tasa de deformación se vuelve muy importante, en cambio en el trabajo a temperatura ambiente, o trabajo en frío, el efecto de la tasa de deformación en el flujo de esfuerzo es despreciable, a comparación del efecto de la deformación en el flujo de esfuerzo.

Otro punto importante que debemos tener en cuenta es la carga requerida para la obtención de las curvas de flujo, esto con el fin de tener el equipo requerido

y no sobrecargar la prensa hidráulica que se tiene en el Laboratorio de Manufactura. Por lo que se hace un análisis

Para las condiciones de la prueba, deben considerarse los siguientes puntos [24]:

Las curvas de flujo de los metales deben determinarse de manera experimental para las deformaciones, la tasa de deformación y la temperatura a las cuales va a existir el proceso de formado de metal.

- Las probetas y los herramientales deben mantenerse a la misma temperatura.
- La probeta cilíndrica debe comprimirse sin abarrilamiento.
- El abarrilamiento se previene usando un lubricante adecuado.

Ya que se han definido los parámetros que son requeridos para las pruebas de compresión y la caracterización de curvas de flujo y coeficientes de fricción, debemos acotar cuales son los valores de las pruebas, con el fin de ser útiles en la aplicación industrial.

1.5.1. Grado de deformación

La deformación a la cual se caracterizan los metales es un valor aleatorio, pero en la literatura podemos observar que se tienen valores desde 0.25 hasta 0.70, como se observa en las tablas del libro “*Cold and Hot Forging – Fundamentals and Applications*”. Aunque haciendo un análisis con respecto a las curvas de flujo que se tienen por parte de Tecnalia, sobre la caracterización del acero a diferentes tasas de deformación y temperaturas, se llevan hasta el 60% de su altura, ver figura 1.28, por lo que ese será el valor máximo a tomar como referencia.

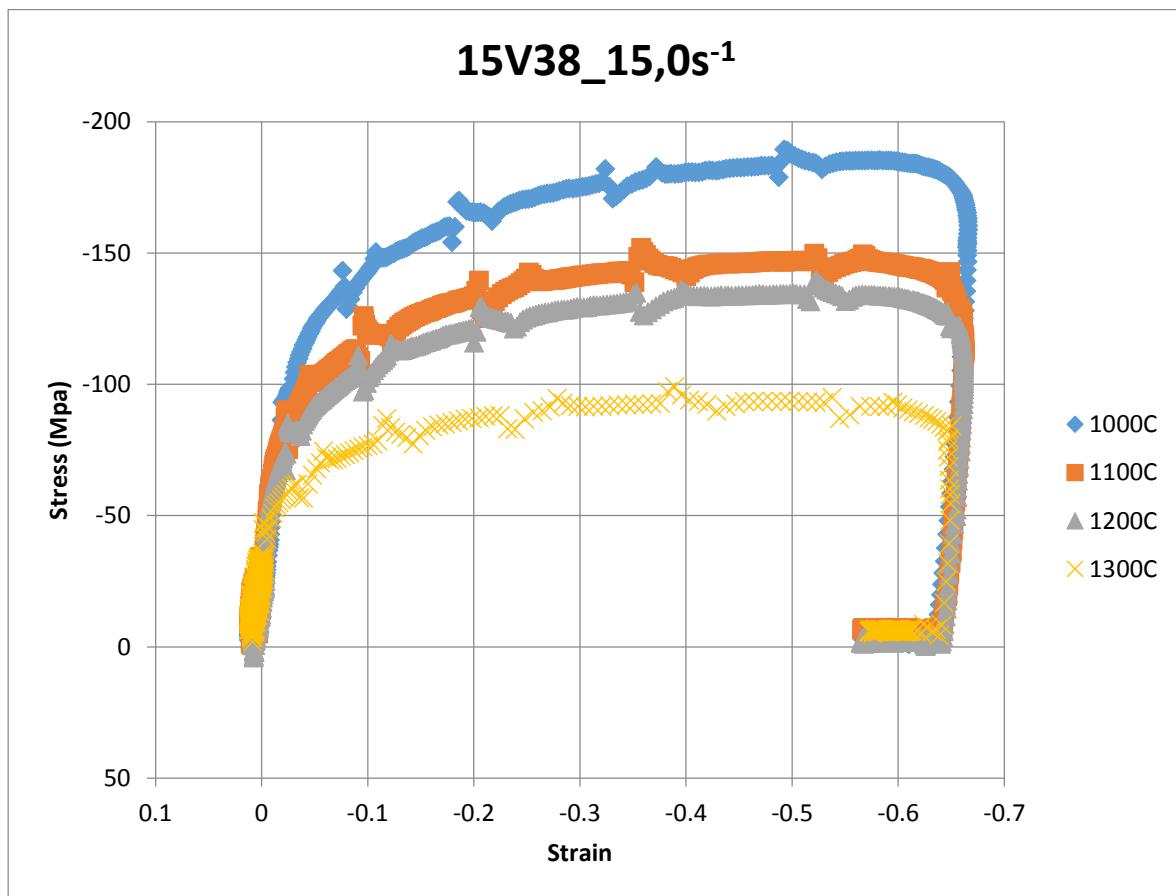


Figura 1.28.- Curvas de flujo del acero 15V38 por parte de Tecnalía a tasa de deformación de 15s-1

1.5.2. Tasa de deformación

La tasa de deformación es un valor que se obtiene dependiendo de los requerimientos que la empresa solicite, por lo que una prensa con su sistema de control para poder obtener diferentes velocidades de compresión es necesaria.

Para la obtención de la tasa de deformación, recurrimos al cambio de la deformación con respecto al tiempo, descrito en la ecuación 1.8.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\ln \frac{h(t)}{h_0} \right]$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v(t)}{h(t)} \quad (1.8)$$

De acuerdo a los valores a los cuales se tiene la caracterización del acero, se tienen los valores de:

- 0.01/s
- 1/s
- 5/s
- 15/s
- 30/s

En el caso de la prensa hidráulica que se tiene en el Laboratorio de Manufactura, tiene una velocidad del ariete en vacío tiene una velocidad de 150mm/s, 5.9in/s, y la velocidad en prensado de 7-15mm/s. La caracterización del acero se haría en el rango de 7-15mm/s, esto dependiendo de la velocidad que se tenga medida en el momento de las pruebas, una vez ya instrumentada la prensa hidráulica.

La tasa de deformación mínima que se podrá medir en la prensa hidráulica del taller, sin hacer modificaciones con una válvula proporcional, es de 0.2733s-1 y la máxima es de 0.5833s-1.

1.5.3. Temperatura

La temperatura a la cual se trabaja debe ser por arriba de la temperatura de recristalización, la cual es para los aceros de 727°C, pero por debajo de la temperatura de fusión, la cual es de aproximadamente 1525°C. El metal se ha caracterizado a diferentes temperaturas, por lo que se usarán las siguientes temperaturas de caracterización:

- 1000°C
- 1100°C
- 1200°C
- 1300°C

Esto con la finalidad de tener los valores a diferentes temperaturas y la industria pueda hacer su aplicación por parte de la empresa PEMSA.

Un punto importante de la temperatura de caracterización es que debe ser un proceso isotérmico, por lo que tanto la temperatura de la probeta, como del herramiental, deben poseer la misma temperatura, obteniendo así curvas uniformes.

1.5.4. Carga requerida para la prueba

Un aspecto importante en esta investigación, consiste en saber la factibilidad de hacer las pruebas con el equipo con el que actualmente se cuenta, es por ello que dentro de los valores más importantes es la carga requerida para hacer las pruebas. De acuerdo a los valores que se tienen, se sabe que la prueba más crítica es a la mayor tasa de deformación con la menor temperatura, es por ello que se busca el valor más alto, siendo la tasa de deformación de 30s⁻¹ y con una temperatura de 1000°C, obteniendo el valor de 209.31MPa a una deformación de 0.70053. El valor del área en función de la altura está dado por:

$$A = \frac{V}{h}$$

Donde V es el volumen del cilindro y h es la altura del cilindro.

El volumen inicial del cilindro, tomando la probeta de Tecnalía, es de:

$$V = \pi r^2 h = \pi \times (10\text{mm})^2 \times 15\text{mm} = 4712.38 \text{ mm}^3 = 4.712388 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Por lo que el área a la altura del 70% del cilindro es de:

$$A = \frac{4.712388 \times 10^{-6} \text{ m}^3}{0.0045m} = 1.0472 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

De la definición conceptual se tiene que el esfuerzo es:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Por lo que la fuerza es:

$$F = \sigma A = 209.31 \text{ MPa} \times 1.0472 \times 10^{-3} \text{ m}^2 = 219,188 \text{ N} = 219.188 \text{ KN}$$

$$\mathbf{F = 219.188 KN}$$

De la especificación de la prensa, se tiene que la fuerza nominal es de **1000KN**, por lo que el valor de la fuerza requerida se encuentre en un rango de trabajo.

1.5.5. Curvas de flujo de bibliografía

En la bibliografía podemos encontrar los valores para la obtención de gráficas de esfuerzo-deformación, la cual se rige bajo la ley exponencial de plasticidad por la ecuación 1.9:

$$\bar{\sigma} = C \bar{\varepsilon}^m \quad (1.9)$$

En donde C es la constante del material y m es el coeficiente de sensibilidad de la tasa de deformación.

En la bibliografía pueden encontrarse los valores C y m para un rango de tasa de deformación y a diferentes temperaturas. El acero representado en la bibliografía que tiene propiedades similares se observa en la Tabla 1.3 [3].

Tabla 1.3.- Valores C (MPa) y m que describen la relación esfuerzo-deformación [2]

ACERO	ε	C	M	C	M	C	M	C	M
ALEACIÓN 0.35 C, 0.27 SI, 1.49 MN, 0.041 S, 0.037 P, 0.03 CR, 0.11 NI, 0.28 MO	Temperatura	900 C		1000 C		1100 C		1200 C	
	0.05	16.6	0.102	12.2	0.125	9.4	0.150	7.4	0.161
	0.10	19.9	0.091	14.8	0.111	11.5	0.121	8.4	0.149
	0.20	23.0	0.094	17.6	0.094	13.5	0.100	9.4	0.139
	0.30	24.9	0.092	19.1	0.093	14.4	0.105	10.2	0.130
	0.40	26.0	0.088	19.6	0.095	14.5	0.112	10.4	0.139
	0.50	25.9	0.091	19.6	0.100	14.4	0.112	10.1	0.147
	0.60	25.9	0.094	19.5	0.105	14.2	0.122	9.7	0.159
	0.70	25.5	0.099	19.2	0.107	13.9	0.126	9.2	0.165

Las gráficas varían de acuerdo a la tasa de deformación, por lo que se hacen a las siguientes tasas de deformación:

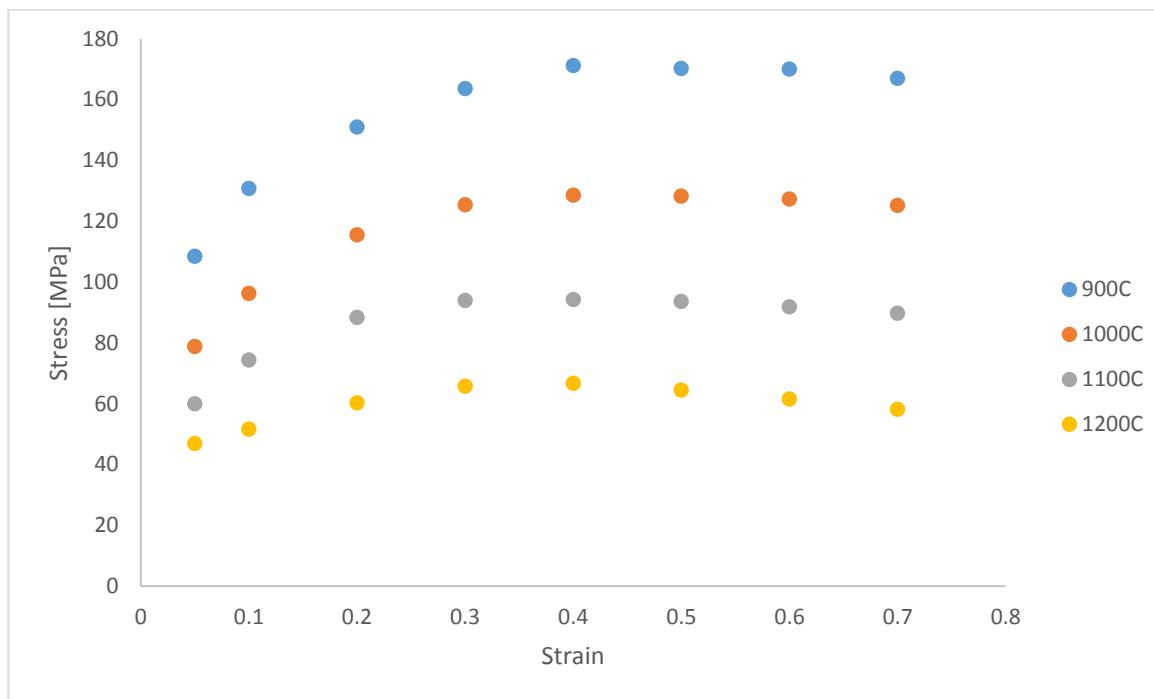


Figura 1.29.- Curva de flujo a tasa de deformación de 0.59s^{-1}

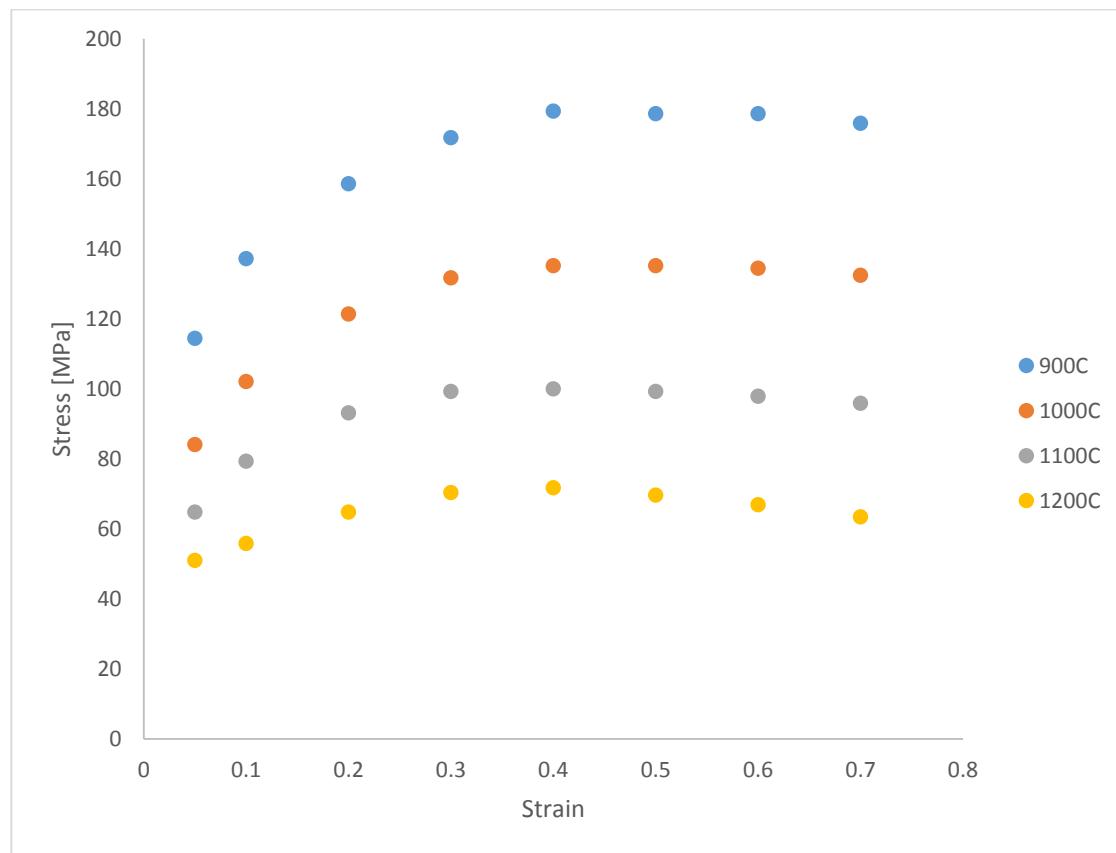


Figura 1.30.- Curva de flujo a tasa de deformación de 1s^{-1}

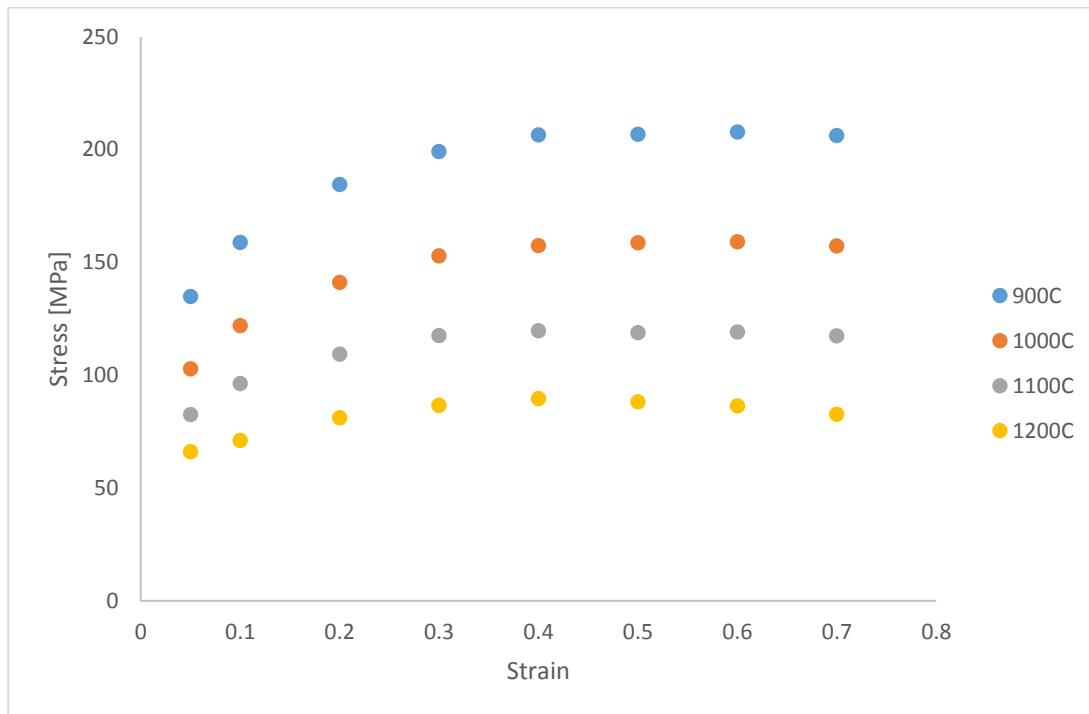


Figura 1.31.- Curva de flujo a tasa de deformación de 5s⁻¹

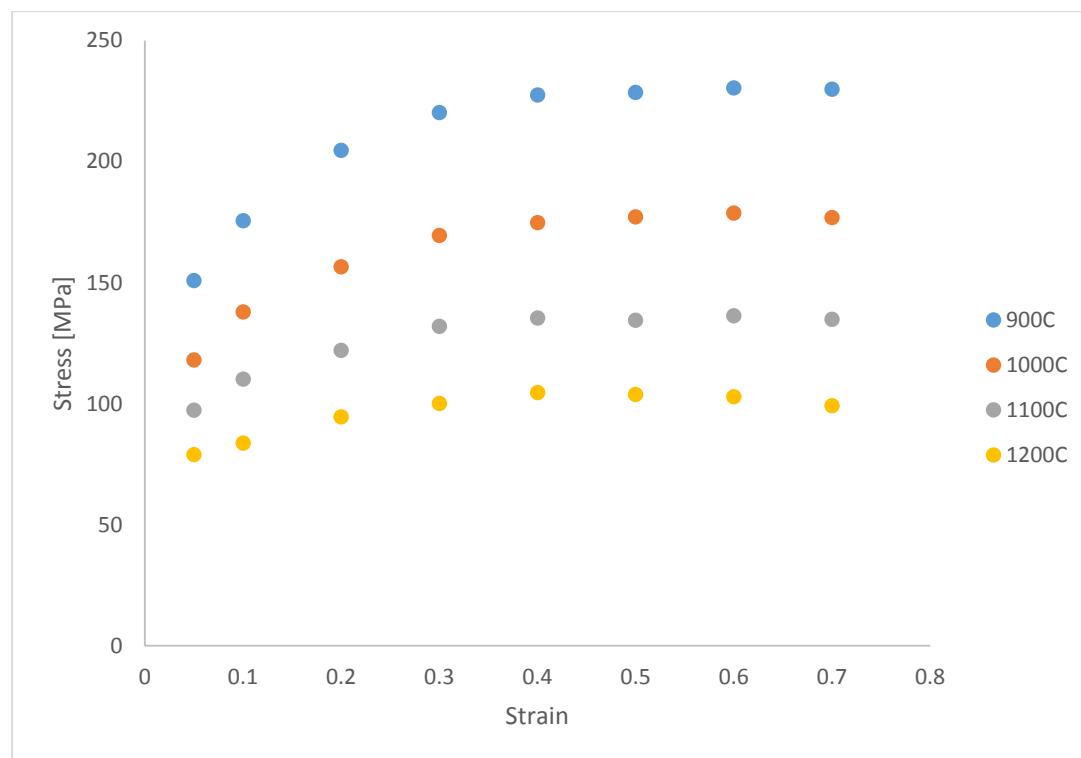


Figura 1.32.- Curva de flujo a tasa de deformación de 15s⁻¹

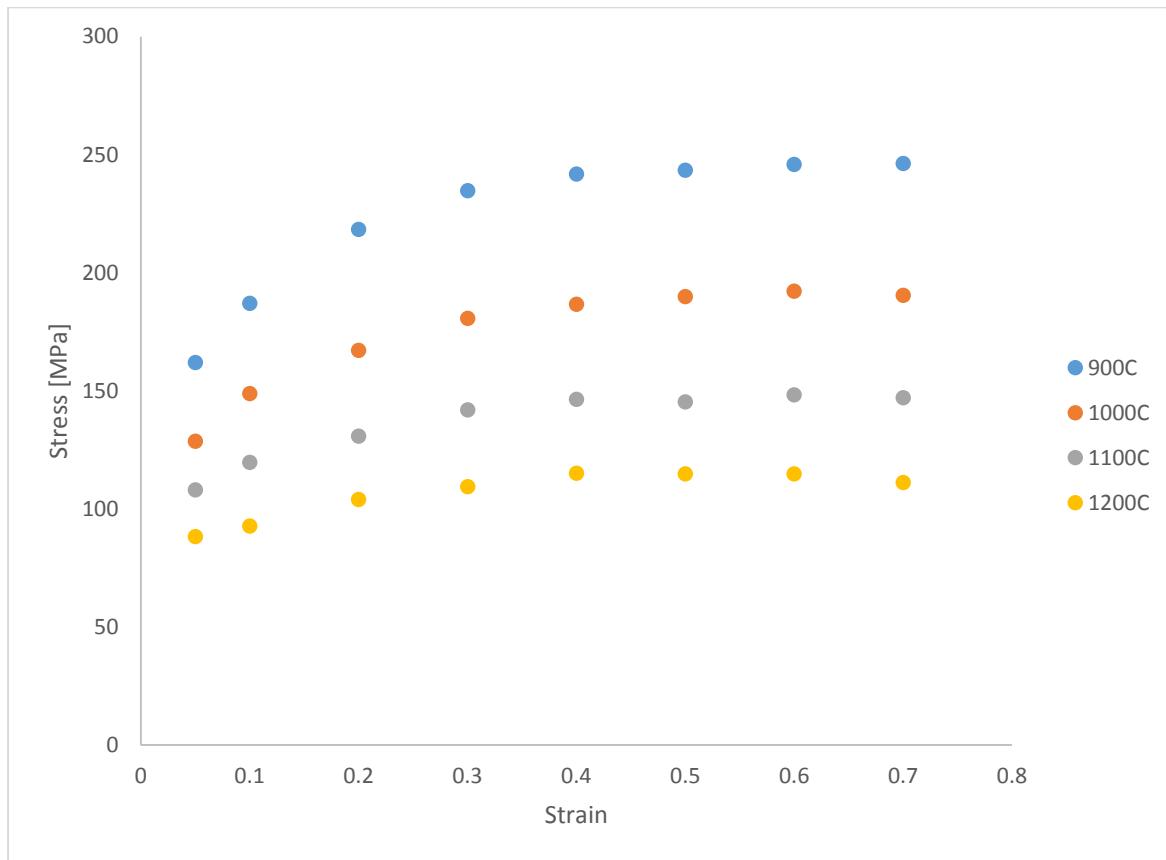


Figura 1.33.- Curva de flujo a tasa de deformación de 30s⁻¹

DISEÑO DE PLASTÓMETRO

2. Diseño de plastómetro

2.1. Antecedentes históricos

Actualmente la Universidad de Guanajuato desarrolla en un proyecto; junto con, la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo y la empresa Pinturas, Estampado y Montajes S.A.P.I. de C.V. enmarcado al “Programa de Estímulos a la Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación 2015” con clave 220125 denominado “Forja Moderna de Cigüeñales con Aceros Especiales para Motores de Alto Rendimiento”. Uno de los objetivos del proyecto consiste en el desarrollo de métodos u equipo de prueba, actualmente no disponible en México, para caracterizar materiales a elevadas temperaturas y con ello disponer del comportamiento termo-mecánico de la materia prima para forja en caliente bajo condiciones de compresión. Esta caracterización termo-mecánica debe ser orientada a la obtención de las curvas de flujo en condiciones de compresión; así como, otras condiciones de temperatura y de tasa de deformación representativas de proceso de manufactura de forja en caliente. En este capítulo, se muestra el proceso de diseño de un plastómetro compatible con una prensa hidráulica modelo YL100 ubicada en el laboratorio de manufactura de la División de Ingeniería del Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato.

La búsqueda en el estado del arte y de la técnica, permitió determinar que en el ERC for Net Shape Manufacturing, en conjunto con la Ohio State University, se trabajó de manera considerable a partir del año 1986 [25] para hacer una metodología propia para la obtención de las curvas de flujo en materiales a través de pruebas de compresión de cilindros, de las cuales la documentación es mínima, esto por ser secreto industrial.

Para la obtención de curvas de flujo se trabaja con varias pruebas, la primera es la prueba de compresión de anillos, esta con la finalidad de obtener el coeficiente de fricción del material [2] y posteriormente se trabaja con la compresión de cilindros, la cual nos da la curva de flujo necesaria para la deformación del material.

De acuerdo con lo documentado por INSTRON, en la década de los 60's se realizó el primer sistema para hacer pruebas a temperatura de 1000 °C, por parte de INSTRON, pero en la actualidad no existe una cámara ambiental para hacer dichas pruebas [26] por parte de dicha compañía.

En México no se tiene registro de alguna cámara de temperatura para la realización de pruebas a altas temperaturas, por lo que el sistema es novedoso a

nivel nacional y con amplia aplicación a nivel industrial, debido a que la industria manufacturera de la región Bajío ha crecido de manera considerable y se espera la llegada de más industrias, por lo que satisfacer la demanda de información tecnológica será de mucha ayuda para el inicio de proyectos por parte de Industria – Universidad.

El sistema de manera general consta de los componentes de la figura 2.1.

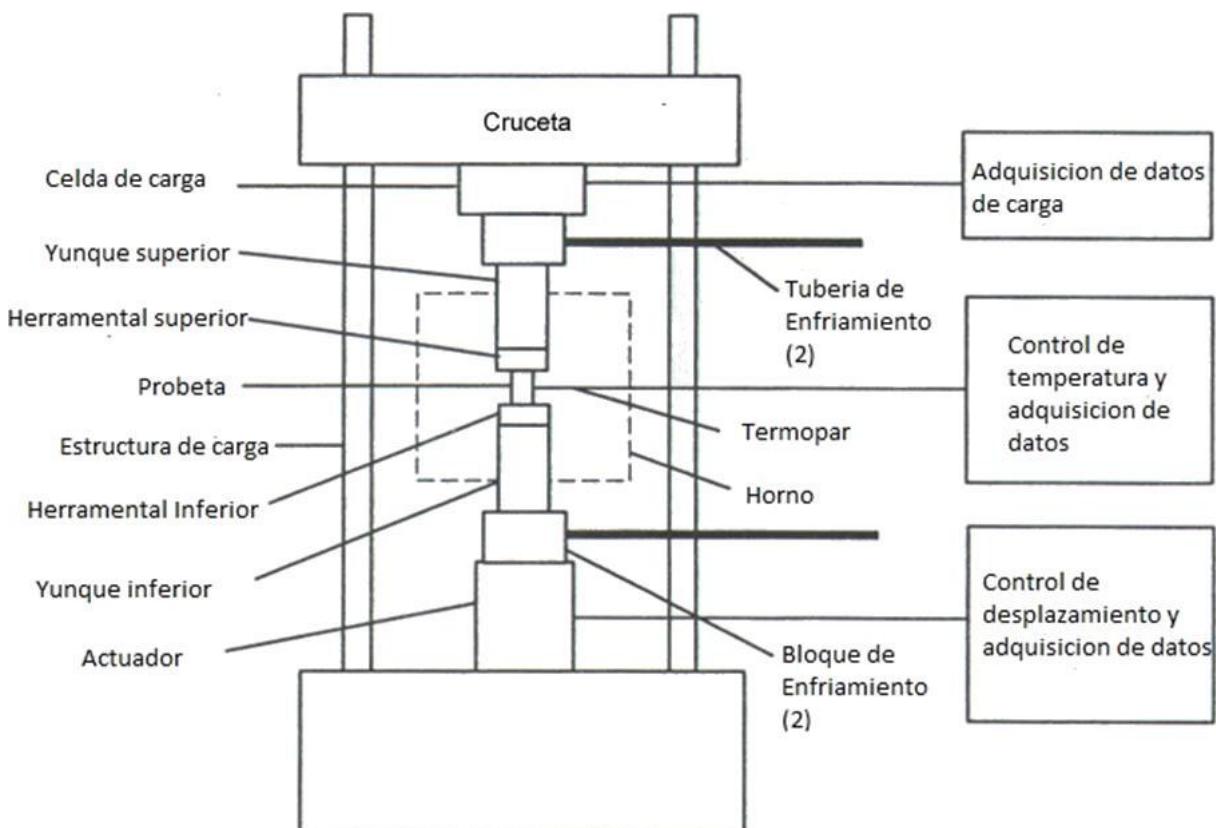


Figura 2.1.- Esquema general para caracterización termo-mecánica [14]

Otro esquema puede ser observado con un poco de mayor claridad y detalle en el artículo de J. R. Douglas, en el cual nos muestra un concepto muy similar al anterior, ver figura 2.2.

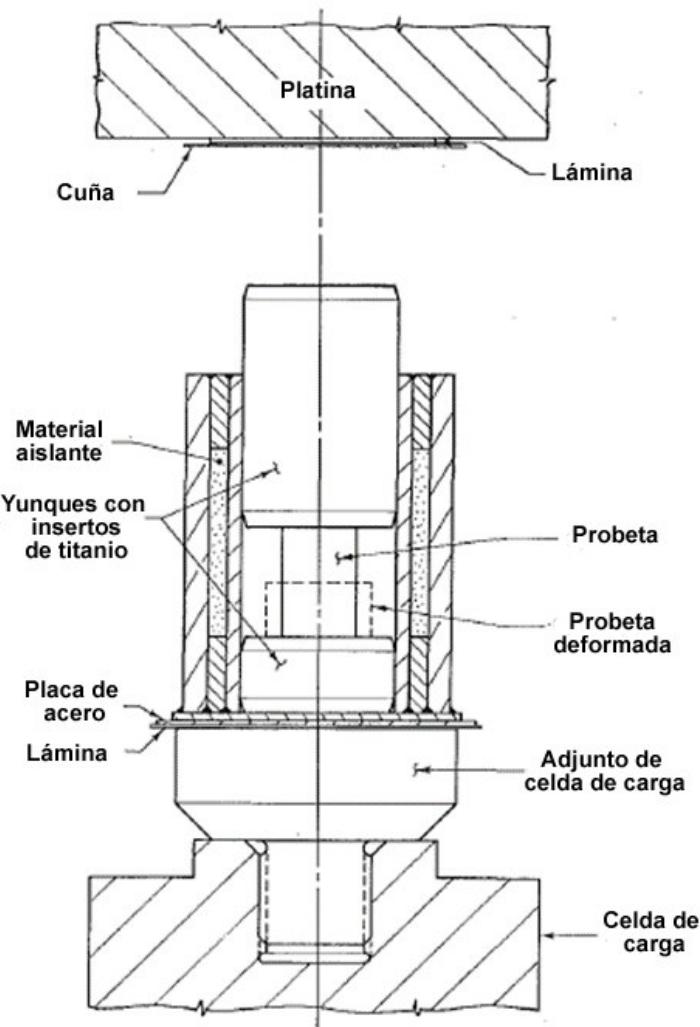


Figura 2.2.- Esquema de dispositivo usado para las pruebas de compresión uniforme [14]

2.2. Conceptualización del sistema para caracterización termo-mecánica

Un requerimiento importante es que el sistema para la caracterización termo-mecánica debe implementarse en una prensa ya instrumentada electrónicamente para la adquisición de datos, por lo que las celdas de carga deben estar calibradas y de la capacidad mínima requerida. Además, el control de desplazamiento y adquisición de datos será de ayuda para calcular la deformación de la probeta. El control de temperatura y adquisición de datos debe hacerse en primer instancia en una probeta de calibración, esto con el fin de tener pegado un termopar a la probeta. Ya que se logra que la probeta tenga una temperatura relativamente constante para ser una prueba isotérmica, se hacen las pruebas con las probetas sin termopar.

La tubería de enfriamiento puede ser reemplazada por con una capa de material aislante, esto con el fin de no transferir demasiado calor al herramiental y posteriormente a las celdas de carga, con el fin de evitar una medición errónea o daño permanente en las celdas.

La selección del herramiental se hará en actividades posteriores, por lo que la forma general debe ser por lo menos de 1.25 veces el diámetro final de la probeta, con la finalidad de que la probeta no tenga un área mayor al del herramiental.

El sistema se encuentra bajo la fase de diseño final, se tiene el prototipo de la fase de diseño conceptual y se muestra en la figura 2.3.

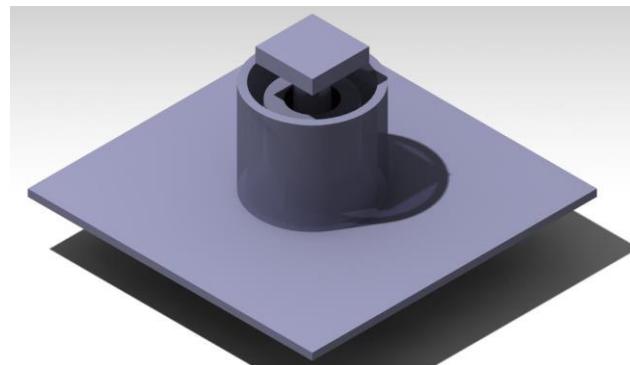


Figura 2.3.- Diseño conceptual del modelo conceptual para forja isotérmica (CATIA®)

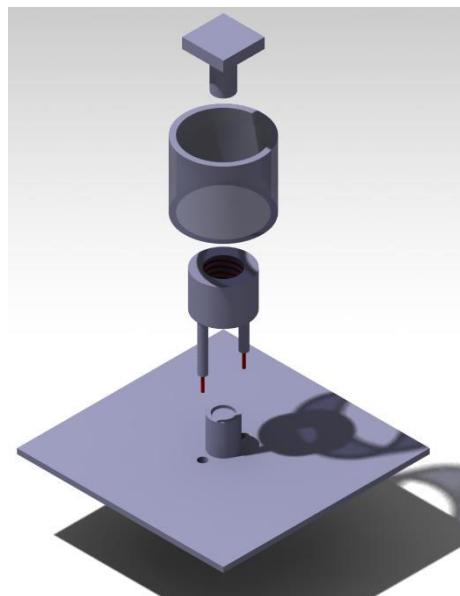


Figura 2.4.- Diseño conceptual del modelo conceptual para forja isotérmica (CATIA®) en explosión

El dispositivo de calentamiento es un embobinado que tiene un recubrimiento de una aleación de Alúmina – Sílice, esto con la finalidad de mantener aislado el embobinado. El diagrama de fase de la Alúmina – Sílice se encuentra en la figura 2.5, donde podemos observar que a mayor cantidad de Alúmina, el punto de fusión es mayor.

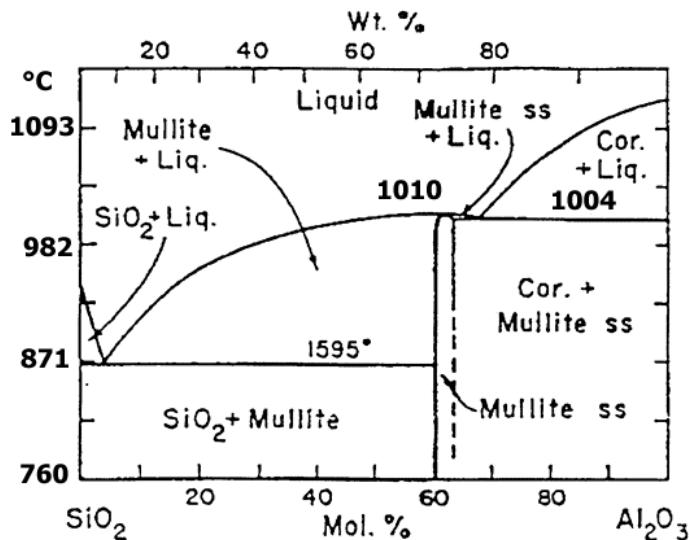


Figura 2.5.- Diagrama de fase de Alúmina – Sílice. [27]

Por lo que una mayor cantidad de Alúmina, hace que el sistema tenga un punto de fusión mayor, así que uno de los requerimientos necesarios para el sistema será encontrar una mezcla con punto de fusión alto o alguna aleación que tenga un punto de fusión alto.

El tipo de embobinado sería dependiendo de los productos de línea que tengan las industrias de fabricación de hornos, un ejemplo puede ser observado en la figura 2.6.



Figura 2.6.- Calentador tipo RDI de Zircar® [28]

Una vez que se tiene el sistema de calentamiento para crear la forja isotérmica, se tiene la parte de la programación para la adquisición de datos, esto con el software LabVIEW®.

Se debe tener en cuenta que las curvas de flujo del material están compuestas por esfuerzo y deformación, por lo que se deducen los datos de entrada que se requieren.

La deformación de la probeta se encuentra dado por la ecuación 2.1:

$$\epsilon = h_i - dh \quad (2.1)$$

Donde dh es la lectura de entrada del sensor de desplazamiento.

El esfuerzo de manera general se encuentra dado por la ecuación 2.2:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

Donde el volumen de la probeta está dado por:

$$V = Ah$$

Donde A es el área del cilindro y h es la altura del cilindro. De la ecuación 2 podemos despejar el área, obteniendo:

$$A = \frac{V}{h}$$

Donde la altura instantánea viene dada por:

$$h = h_i - dh$$

Por lo que el área instantánea viene dada por:

$$A = \frac{V}{h_i - dh}$$

Y finalmente, el esfuerzo se encuentra dado por la ecuación 2.3:

$$\sigma = \frac{F(h_i - dh)}{V} \quad (2.3)$$

Esto con la finalidad de actualizar el sistema de adquisición de datos de la prensa hidráulica y así la obtención de los datos de salida necesarios para la composición de las curvas de flujo a las tasas de deformación correspondientes.

Actualmente en el Laboratorio de Manufactura de la Universidad de Guanajuato se cuenta con una prensa hidráulica de 100tons de marca MEISTER con modelo YL32-100. Las especificaciones con las cuales cuenta vienen mostradas en la figura 2.7.

ESPECIFICACIONES		Unidad	YL32-63	YL32-100	YL32-200	YL32-250	YL32-315
Presión de cierre	ton	63	100	200	250	315	
Fuerza de expulsión	ton	16	19.6		28		40
Fuerza del retorno	ton	12.5	16.5	24	40	60	
Carrera del carro	mm	500		710		800	
Carrera del colchón de aire	mm	160		200		250	
Máxima apertura	mm	800		1,120		1,200	
Velocidad de prensado	Mov. en vacío	mm / s	115	200			100
	Prensado	mm / s	-	8 - 30			4 - 10
	Retorno	mm / s	105	150	90		60
Velocidad del colchón de aire	Expulsión	mm / s	90	120	175		100
	Retorno	mm / s	220	250	340		150
Tamaño de la mesa	Largo	mm	570	630	1,000		1,260
	Ancho	mm	500	630	940	1,000	1,160
Dimensiones	Izquierda - Derecha	mm	1,700	2,500	1,380		3,100
	Ancho - Largo	mm	2,000	1,430	2,120	2,180	2,120
	Altura sobre el piso	mm	1,900	3,215	3,880	3,900	4,700
Motor	hp	7.3	15		25		30
Peso	kg	2,800	3,700	9,000	10,300	14,000	

Figura 2.7.- Especificaciones técnicas de prensa TL32-100

Al igual que los sistemas de línea, deben obtenerse valores de suma importancia para la obtención de gráficas, las cuales son: desplazamiento, velocidad y fuerza. La prensa se encuentra en proceso de ser instrumentada para la obtención de las variables, pero la resolución del desplazamiento es de 1cm, por lo cual se debe de hacer un estudio de los sensores que se usan actualmente en los sistemas de medición de prensas instrumentadas.

En las prensas, tanto de línea como en algunos casos a nivel instrumentada, se usan sensores LVDT, esto por la facilidad de instrumentación, excelente resolución y rapidez de muestreo. Existen otros sensores como son los laser y RVDT, los cuales proveen un resultado confiable para las pruebas de compresión. De los parámetros necesarios a revisar, el más importante es la carrera del carro, la cual es de 500mm, por lo que si se quiere instrumentar la prensa para cualquier prueba, debe tener por lo menos 20in de largo, pero para la prueba con 2in es suficiente.

Se proponen dos tipos de sensores, un LVDT y un RVDT. Las características son mostradas en la tabla 2.1.

Tabla 2.1.- Características de sensor RVDT y LVDT.

	RVDT	LVDT (SMART POINTER)
ENTRADA	TRANSFORMADOR 120/230AC – 24VDC	6-24VDC
SALIDA	POTENCIÓMETRO/VOLTAJE/CORRIENTE	0-5VDC / RS232*
RESOLUCIÓN	0.003IN	0.0055IN / 0.000137IN*
RANGO	3.94/5.91/11.8/19.7/29.5/39.4/59.1 [IN]	1.38/2.95/8.86 [IN]
VELOCIDAD DE MUESTREO	---	400MS / 3200 MS*
LINEALIDAD	0.1/0.25/0.5%	0.4%
COSTO	200DLLS	261 / 319

*(ANALÓGICO/DIGITAL)

Un punto importante es en donde se encuentra ubicada la celda de carga, esto con el fin de contemplar en la parte de diseño el uso de un pozo térmico para no dañarla. La posición de colocación de la celda de carga se muestra en la figura 2.8.



Figura 2.8.- Prensa hidráulica YL32-100

El pozo térmico sirve para evitar que el calor fluya hasta la celda de carga y obtengamos datos erróneos o, en el caso más extremo, que tenga un daño irreversible.

2.3. Selección de materiales

Una vez que se conocen los requerimientos mínimos para el plastómetro, mencionados en el reporte “Revisión de metodologías para caracterización termomecánica de aceros para forja en caliente”, debe hacerse un análisis de cuáles son los factores a analizar para lograr un óptimo herramiental.

Dentro de las variables a analizar son:

- **Bajo Costo: en el proyecto se cuenta con una cantidad monetaria máxima, por lo cual no se pueden elegir elementos costosos.**
- **Alto punto de fusión: la temperatura a trabajar es de 1300°C.**
- Ligero: se debe poder montar con facilidad en la prensa de trabajo
- Maniobrabilidad: debe poderse mover dentro de la prensa para ajustarse, así como poderse remover para otras pruebas
- **Dureza alta: son pruebas de compresión y va a estar sometida a compresión**
- Baja corrosividad: debe durar una gran cantidad de pruebas
- Compacto: no debe tener que usar un equipo necesario para trasladarse
- Robusto: debe poder realizar la mayor cantidad de pruebas
- Versátil: debe acoplarse al usuario y al sistema de prensa.
- **Durable: debe tener una larga vida útil.**
- Poco mantenimiento: no debe fallar con frecuencia
- Fácil instalación: su montaje debe ser fácil.
- **Facilidad de obtención de material: debe existir una cartera amplia de proveedores en el mercado.**

En las cuales los requerimientos importantes están marcados en letra oscura.

Para los dos diseños conceptuales se pensaron los mismos materiales, los cuales son:

- Herramental superior: Acero H13, para trabajo en caliente.
- Cámara de aislamiento: Alumina – Silice, para mantener la temperatura aislada de la prensa.
- Embobinado para calentamiento: Cobre.

Una vez conceptualizado el sistema, se prosigue a la selección de materiales. Se deben eliminar aquellos que tengan una baja resistencia a la deformación,

debido a que se hará una prueba de compresión y lo más importante, se harán las pruebas a altas temperaturas.

Viendo una carta de materiales general de la resistencia, se puede dar idea general de uno de cuales materiales serían los óptimos para su uso, como son mostrados en la figura 10.

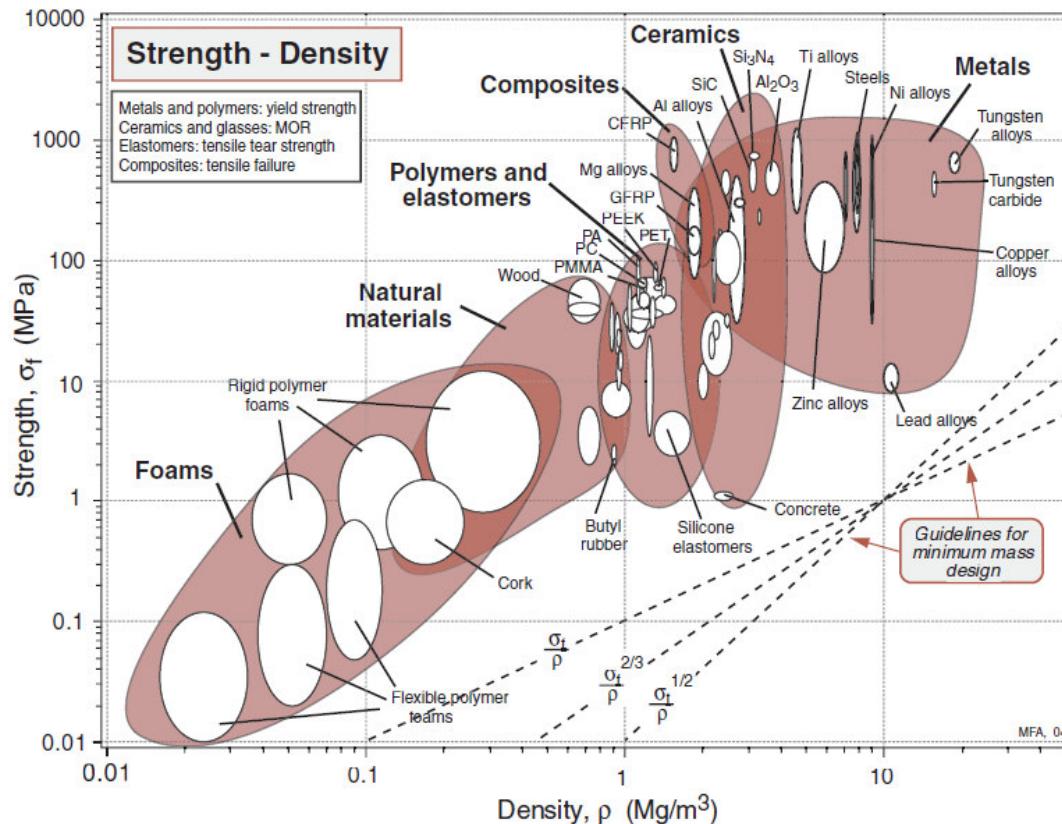


Figura 2.9.- Carta Densidad-Resistencia [29]

De la figura 2.9 podemos eliminar los materiales polímeros, naturales, espumas, elastómeros y materiales compuestos.

Si tomamos en cuenta de que por accidente se cayera el herramiental, lo más probable es que los cerámicos pierdan su geometría, fracturándose en dos o más pedazos, por lo que estos también son eliminados por su fragilidad.

En la carta de Módulo de Young – Resistencia a la fractura, ver figura 2.10, puede observarse cuáles materiales serían óptimos para evitar una fractura.

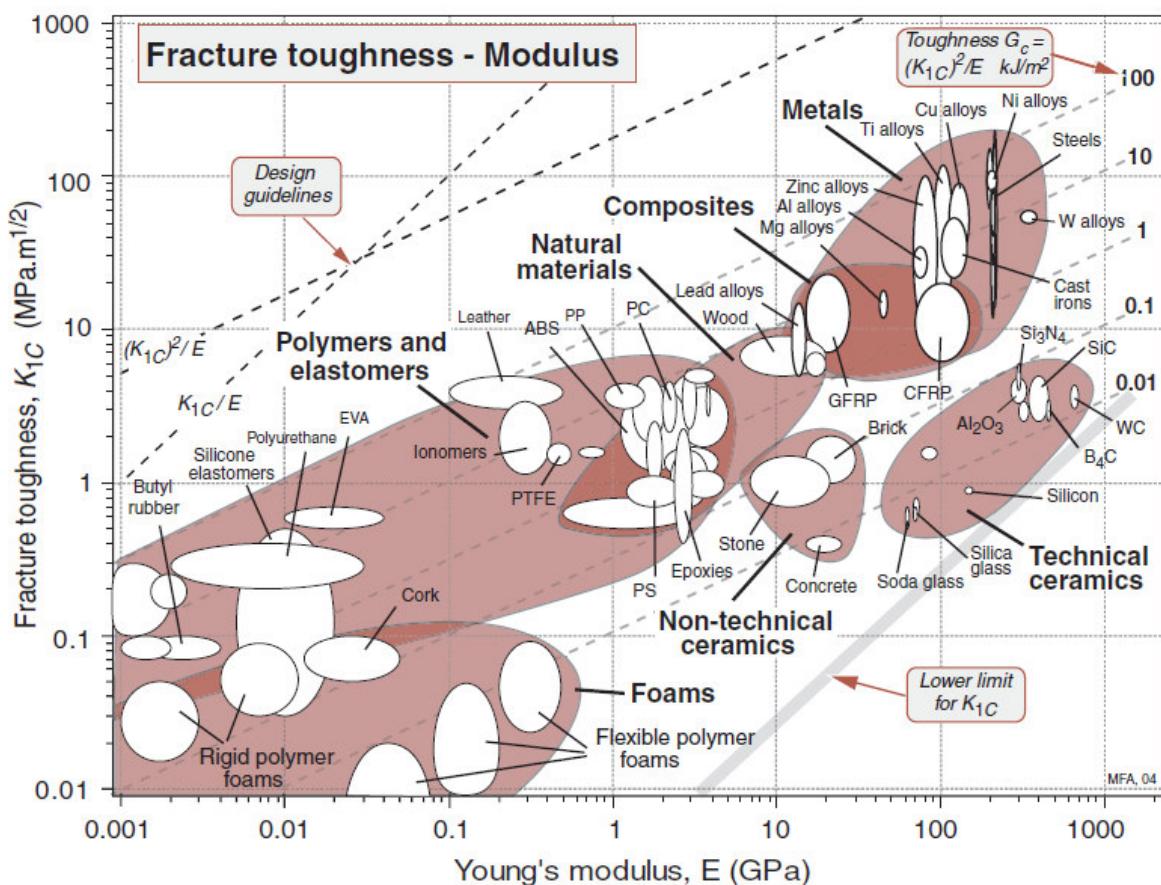


Figura 2.10.- Módulo de Young – Resistencia a la Fractura. [29]

La tubería de enfriamiento puede ser reemplazada por una capa de material aislante, como es el material tablarroca, el cual tiene propiedades buenas a la compresión por ser un cerámico, además de ser usado en el esquema de la figura 8.

El dispositivo de calentamiento es un embobinado que tiene un recubrimiento de un material que sea resistente al calor, esto con la finalidad de mantener aislado el embobinado y al exterior. El Alumina-Silice es un material especial para este caso. El diagrama de fase de la Alúmina – Sílice se encuentra en la figura 2.5 [7], donde podemos observar que a mayor cantidad de Alúmina, el punto de fusión es mayor.

Por lo que una mayor cantidad de Alúmina, hace que el sistema tenga un punto de fusión mayor, así que uno de los requerimientos necesarios para el sistema será encontrar una mezcla con punto de fusión alto o alguna aleación que tenga un punto de fusión alto.

Otro tipo de material y con mayor facilidad para conseguir es el cemento refractario, o para altas temperaturas, el cual puede soportar hasta los 1450°C, esto es suficiente para poder obtener un sistema que no expida calor a la celda de carga, además de no dañar el sistema ni a la prensa.

2.4. Diseño a detalle de componentes

Una vez que se cuenta con la conceptualización del sistema, se da paso a seguir con el diseño a detalle. Se debe tomar en cuenta desde el montaje en la prensa hasta el herramiental.

Se pensó en un diseño que fuera portable para otra prensa, además de ser reproducibles contando con los materiales para su elaboración.

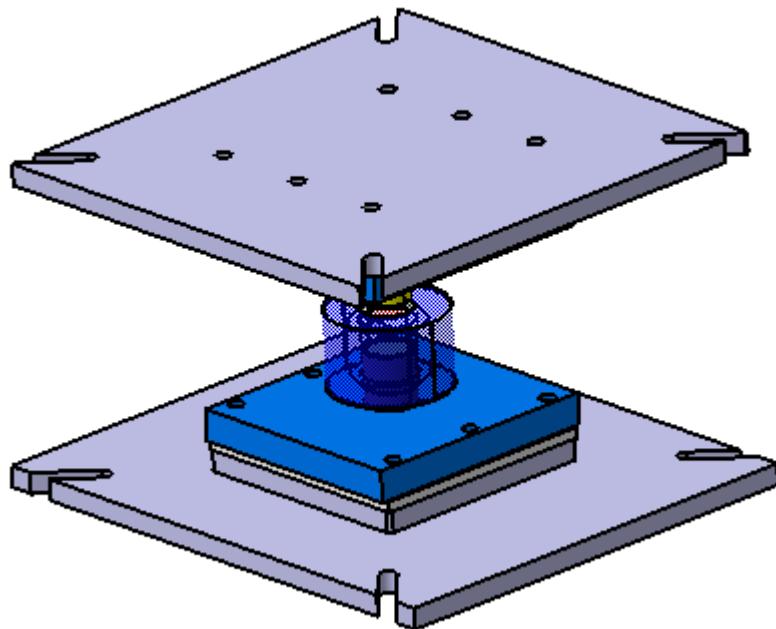


Figura 2.11. Diseño completo del plastómetro en Catia ®

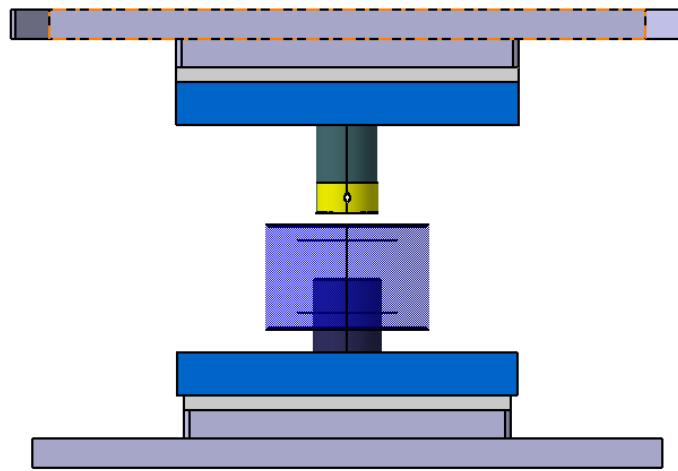


Figura 2.12.- Diseño del plastómetro para alta temperatura.

El plastómetro debe contar con todos los elementos descritos en la figura 2.1 y 2.2, por lo que se hizo un conjunto de los elementos que lo contienen y se descartaron aquellos que no tuvieran impacto en la fabricación. El pozo térmico se dejó, debido a que la tablarroca es suficiente para poder aislar parte de la temperatura que se transfiera por conducción entre los herramientales y las placas. Además de no tener una justificación de hacerse, esto debido a que se tenía planeado tener la celda de carga debajo de la platina de la prensa, pero al tenerse en la parte superior, no existe transferencia de calor que interfiera con los datos de salida, así como le afecte de manera permanente.

En la figura 2.11 y 2.12 pueden observarse los elementos del plastómetro en conjunto. En la figura 2.13 se observa el plastómetro en explosión, con el nombre de cada uno de los componentes.

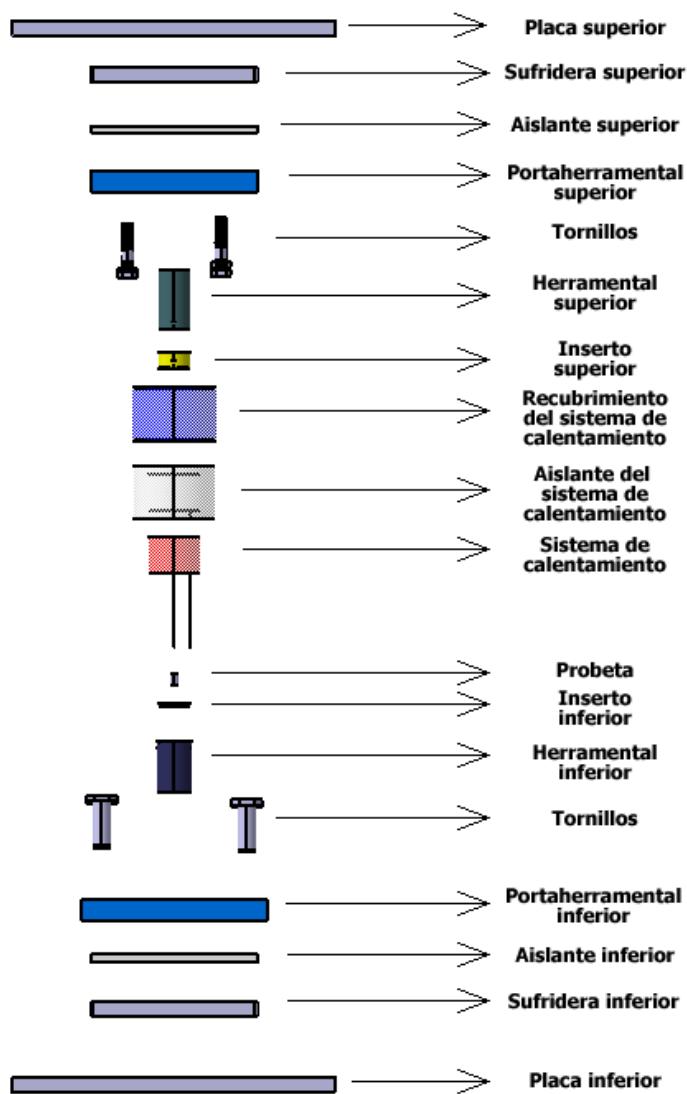


Figura 2.13.- Plastómetro separado en sus partes

A continuación se menciona el funcionamiento de cada uno de los elementos:

- Placa superior: poder tener una base para montar piezas a la platina superior de la prensa
- Sufridera superior: pieza de desgaste para no dañar la placa superior
- Porta-Aislamiento: pieza para montar el aislamiento a la sufridera superior
- Aislamiento: elemento para evitar calentamiento en la parte superior del sistema
- Herramental superior: base para comprimir las probetas
- Inserto herramiental superior: pieza de desgaste y contacto con las probetas

- Recubrimiento final: lámina para cubrir el aislante y mantener todo en conjunto
- Aislamiento de Alumina-Silice: recubrimiento para mantener el calor dentro del área de prueba
- Embobinado: dispositivo eléctrico para calentamiento de probetas y herramientales
- Inserto herramiental inferior: pieza de desgaste y contacto con las probetas
- Herramental inferior: base para comprimir las probetas
- Porta-herramental: pieza para montar el herramiental a la sufridera inferior
- Sufridera inferior: pieza de desgaste para no dañar la placa inferior
- Placa inferior: poder tener una base para montar piezas a la platina inferior de la prensa

Una vez que se conocen todos y cada uno de los componentes del plastómetro, se hace una matriz de componentes y en relación a las variables descritas al inicio del punto 1.2 se da una puntuación de 1, 3 y 5, donde 1 es poco importante y 5 muy importante. Esto se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Relación de variables importantes vs componentes

	BAJO COSTO	ALTO PUNTO DE FUSIÓN	DUREZA ALTA	DURABLE	FACILIDAD DE OBTENCIÓN DE MATERIAL
PLACA SUPERIOR	3	1	5	5	1
SUFRIDERAS SUPERIOR	1	1	5	5	1
PORTA-AISLAMIENTO	3	1	3	3	3
AISLAMIENTO	3	5	5	5	3
HERRAMENTAL SUPERIOR	5	5	5	3	5
INSERTO SUPERIOR	5	5	5	5	5
RECUBRIMIENTO FINAL	1	3	1	1	1
AISLAMIENTO DE ALUMINA - SILICE	3	5	1	5	5
EMBOBINADO	5	5	1	5	5
INSERTO INFERIOR	5	5	5	5	5

HERRAMENTAL INFERIOR	5	5	5	3	5
PORTE-HERRAMENTAL	3	1	3	3	3
SUFRIDERA INFERIOR	1	1	5	5	1
PLACA INFERIOR	3	1	5	5	1
SENSOR DE DESPLAZAMIENTO	1	1	1	5	5

Para los materiales de cada una de las partes, se hace una lista de ellos y con los posibles vendedores. Esta se enlista en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Relación pieza-material-proveedor

	MATERIAL	PROVEEDOR
PLACA SUPERIOR	A36	SERVIACERO
SUFRIDERA SUPERIOR	A36	SERVIACERO
PORTE-AISLAMIENTO	A36	SERVIACERO
AISLAMIENTO	TABLAROCA	HOME DEPOT
HERRAMENTAL SUPERIOR	TZM	TMO
INSERTO SUPERIOR	H13	TMO
RECUBRIMIENTO FINAL	ACERO INOXIDABLE	SERVIACERO
AISLAMIENTO DE ALUMINA - SILICE	AL203-SIO2	INDUCTION TECHNOLOGIES
EMBOBINADO	---	INDUCTION TECHNOLOGIES
INSERTO INFERIOR	H13	TMO
HERRAMENTAL INFERIOR	TZM	TMO
PORTE-HERRAMENTAL	A36	3
SUFRIDERA INFERIOR	A36	1
PLACA INFERIOR	A36	1
SENSOR DE DESPLAZAMIENTO	RVDT/LVDT	NEWARK

Finalmente, se monta el diseño del plastómetro en el dibujo de la prensa hidráulica del Laboratorio de Manufactura, esto para estar seguros de que las dimensiones con las cuales se cuenta son suficientes para nuestro sistema. Puede observarse en la figura 2.14 el tamaño proporcional del plastómetro en relación con el tamaño de la prensa hidráulica.

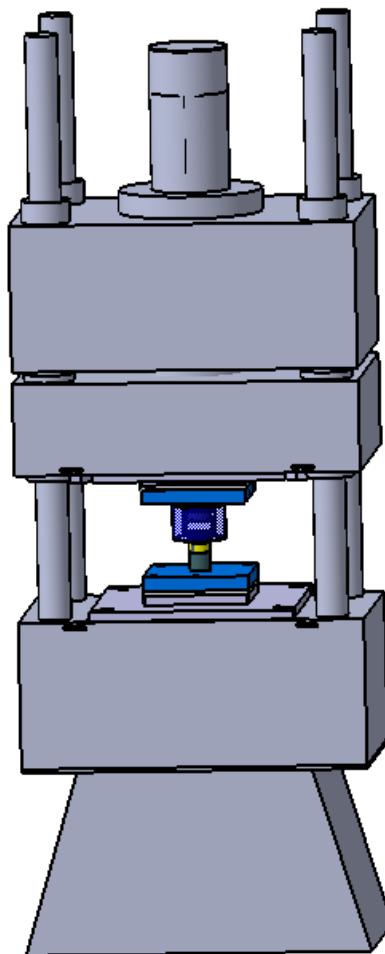


Figura 2.14.- Plastómetro montado en la prensa.

NOTA: Los planos de fabricación se encuentran adjuntos en un CD que posee el autor, los directores de tesis y los sinodales del examen de titulación debido a la confidencialidad del proyecto con la empresa PEMSA.

SIMULACION DE PROBETAS EN ANSYS LS-DYNA

3. Simulación de probetas en ANSYS LS-DYNA

3.1. Método de elemento finito

El elemento finito es la aproximación numérica que describe a un sistema mecánico. Un medio físico es modelado a través de un sistema de ecuaciones que lo representan; las ecuaciones son acompañadas de restricciones iniciales y condiciones de frontera para una descripción matemática más cercana al fenómeno real.

La metodología con la cual se rige el método de elemento finito es la discretización de un sistema mecánico en un número de elementos determinados. Estos elementos vienen representados de manera individual por una ecuación dentro del sistema. La interacción de los elementos entre si es a través de uno o más nodos. Esta metodología sirve para resolver problemas de carácter estático, quasi-estático o dinámicos.

El sistema puede ser descrito por la ecuación 3.1:

$$M \cdot a + C \cdot v + K \cdot u = F_{ext} \quad (3.1)$$

Donde:

M = Matriz de masas

a = Vector de aceleraciones nodales

C = Matriz de amortiguamiento

v = Vector de velocidades nodales

K = Matriz de rigidez

u = Vector de desplazamientos nodales

F_{ext} = Vector de fuerzas externas aplicadas al sistema

En el método de elemento finito existen dos formas de solución a los problemas matemáticos: el implícito y el explícito. En el **método explícito**, se impone un desplazamiento y un tiempo, generando una velocidad y una aceleración, por lo que se usa la ecuación 3.1, la cual tiene como resultado la obtención de la fuerza aplicada en el cuerpo. En el **método implícito**, el análisis requiere de la aplicación de una fuerza para la obtención de un desplazamiento, es por ello que al

conocer únicamente una variable (fuerza), se usa la ecuación 3.2 para la obtención del desplazamiento:

$$K \cdot u = F_{ext} \quad (3.2)$$

De esta manera, la ecuación (3.2) se resuelve en cada incremento, a través del método de Newton-Raphson, lo cual tiene una ventaja de corroborar que exista un equilibrio estático en el sistema, siempre y cuando el sistema sea lineal; en cambio, si el sistema fuera no lineal, el tiempo de cómputo se eleva por el número elevado de iteraciones que se requieren. En el **método explícito**, la ecuación 3.1 es resuelta con los valores inmediatos anteriores para el cálculo del valor presente, por lo cual no requiere un número grande de iteraciones.

Dependiendo de los sistemas que se requieran resolver, es el tipo de método que se utiliza. La figura 3.1 hace una comparación de los problemas que pueden resolverse, dependiendo del tipo de problema que se tiene.

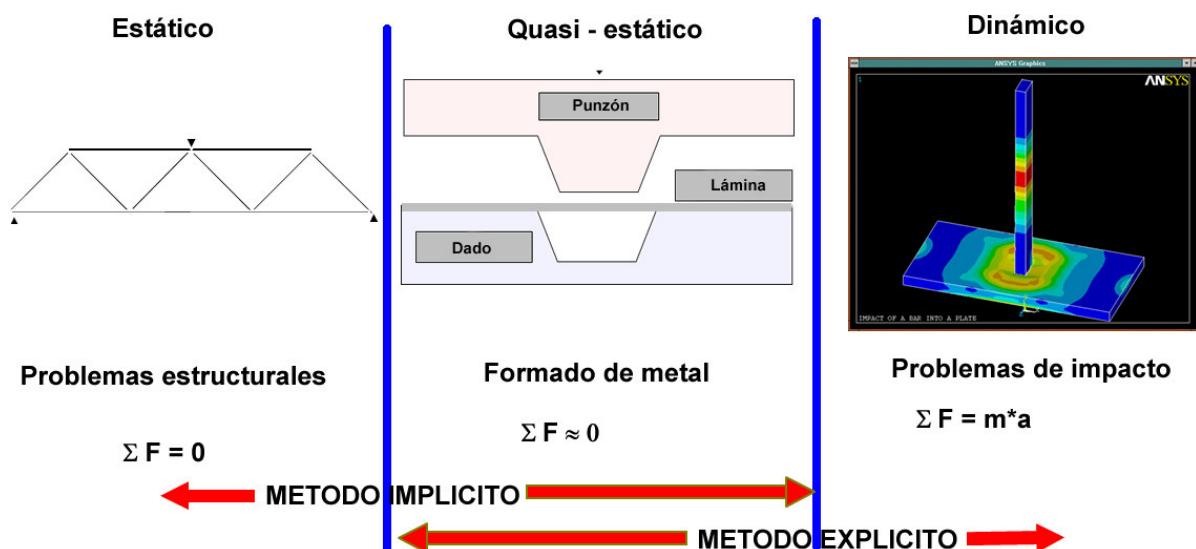


Figura 3.1 Comparación de método implícito y explícito [30]

3.2. Elementos

ANSYS LS-DYNA cuenta con 10 elementos para sus análisis, los cuales son [31]:

- SOLID 164
- SHELL 163
- PLANE 162
- SOLID 168
- BEAM 161
- LINK 160

- LINK 167
- COMBI 165 Spring-Damper
- MASS 166

Los elementos con los cuales cuenta ANSYS LS-DYNA son para análisis en 2D y 3D; en el caso de 2D únicamente se cuenta con el PLANE162, para los casos 3D se cuentan con los otros nueve elementos.

Un análisis por elemento finito puede producir una gran cantidad de datos. Las variables de solución, como los son las deformaciones y los esfuerzos, son computarizadas a través del análisis para cada incremento y se encuentran localizadas dentro del modelo. A estas variables se les llama “puntos de integración” y son diferentes a los nodos.

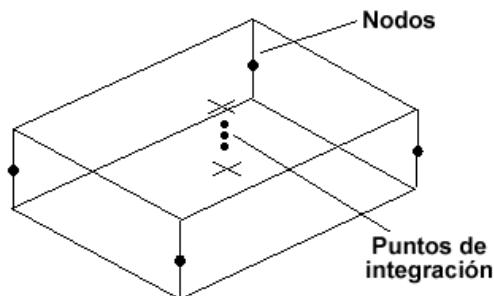


Figura 3.2 Puntos de integración en SOLID164 [31]

Los elementos explícitos con un punto de integración y con desplazamientos lineales son los más adecuados para aplicaciones no lineales con grandes deformaciones. Además debe tenerse en cuenta la geometría con la cual se va a trabajar, como lo son las probetas de compresión en el caso nuestro.

Los dos elementos que se explican a continuación son los que se utilizarán en las simulaciones, debido a su apego a la realidad y opciones del material.

PLANE162

Elemento en 2D con 4 nodos y 6 grados de libertad. Puede ser usado de manera plana (X-Y) o con axisimetría (eje Y de simetría). Permite especificar un esfuerzo plano, axisimetría o la opción de deformación plana. Para la formulación de axisimetría, se puede especificar el área o el volumen en el cual se pone el peso. Tiene dos formulaciones: Lagrangiana y Lagrangiana-Euleriana arbitraria.

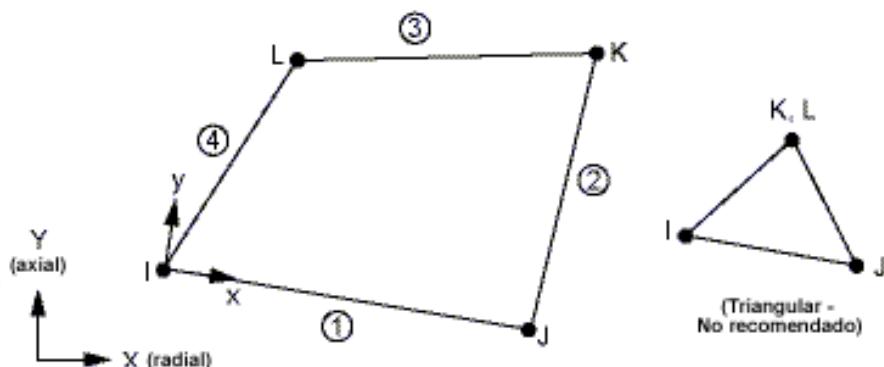


Figura 3.3 Elemento PLANE162 [31]

Un punto importante que se debe tomar en cuenta para el elemento es el modelo de material que se puede usar, esto debido a la formulación con la cual se maneja cada uno y las constantes que se tienen de entrada. Los modelos de material disponibles para axisimetría son los siguientes:

- Isotropic Elastic
- Orthotropic Elastic
- Elastic Fluid
- Viscoelastic
- Bilinear Isotropic
- Temperature Dependent Bilinear Isotropic
- Bilinear Kinematic
- Plastic Kinematic
- Power Law Plasticity
- Rate Sensitive Powerlaw Plasticity
- Strain Rate Dependent Plasticity
- Piecewise Linear Plasticity

SOLID164

El elemento SOLID164 es un elemento “brick” con ocho nodos y nueve grados de libertad. Usa integración reducida, además de un control de “hourglass” viscoso para una formulación más rápida. La ventaja de usar integración reducida es el tiempo de cómputo, por lo que es apto para grandes deformaciones. En caso de hacer un análisis con integración completa, el tiempo de cómputo se eleva a cuatro veces el tiempo normal con la integración reducida.

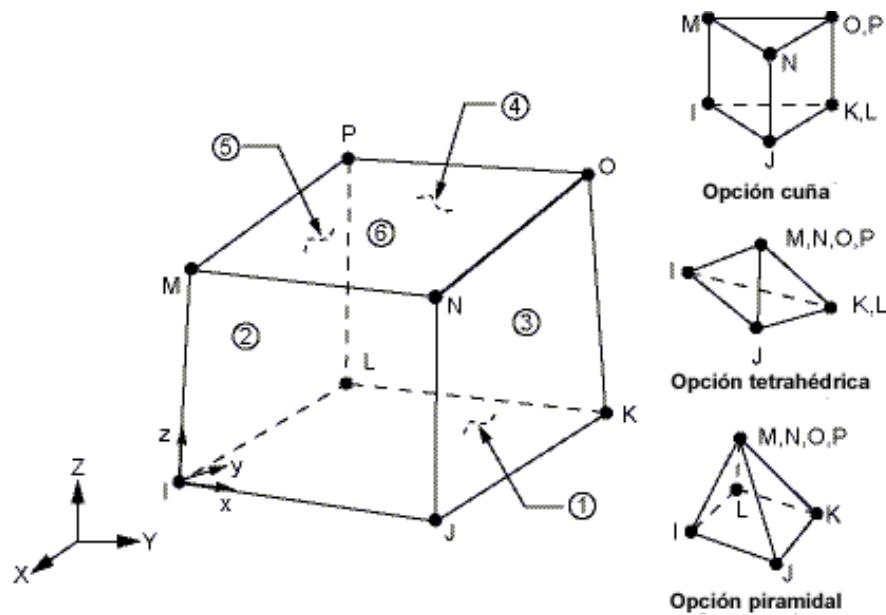


Figura 3.4 Elemento SOLID164 [31]

Los modelos de material disponibles son los siguientes:

- Isotropic Elastic
- Orthotropic Elastic
- Anisotropic Elastic
- Bilinear Kinematic
- Plastic Kinematic
- Viscoelastic
- Blatz-Ko Rubber
- Bilinear Isotropic
- Power Law Plasticity
- Strain Rate Dependent Plasticity
- Composite Damage
- Concrete Damage
- Geological Cap
- Piecewise Linear Plasticity
- Honeycomb
- Mooney-Rivlin Rubber
- Barlat Anisotropic Plasticity
- Elastic-Plastic Hydrodynamic
- Rate Sensitie Powerlaw Plasticity
- Elastic Viscoplastic Thermal
- Closed Cell Foam
- Low Density Foam
- Viscous Foam
- Crushable Foam
- Johnson-Cook Plasticity
- Null
- Zerilli-Armstrong
- Bamman
- Steinberg
- Elastic Fluid

3.3. Análisis por elemento finito

El análisis por elemento finito sigue una serie de pasos base, los cuales son perfeccionados por el analista para lograr un control de todas las variables del sistema. En base al manual de usuario de ANSYS LS-DYNA la serie de pasos recomendados son los siguientes [31]:

1. Construir el modelo
 - 1.1. Definir el tipo de elemento y las constantes reales
 - 1.2. Especificar las propiedades del material
 - 1.3. Definir la geometría
 - 1.4. Mallar el modelo
 - 1.5. Definir los contactos
2. Aplicar las cargas al sistema
3. Revisión de resultados

3.3.1. Construir el modelo

Definición del tipo de elemento y las constantes reales

Para definir el tipo de elemento y las constantes reales que se requieren, debe hacerse un análisis de las necesidades del problema. El análisis por elemento finito tiene la ventaja de dar resultados, siempre y cuando se tengan todos los pasos, pero no por tener resultados estos van a ser correctos, es por ello que el analista debe tener cierta habilidad para la interpretación de los resultados.

Especificación las propiedades del material

Los modelos de material son los que describen el comportamiento del cuerpo al deformarse. Cada uno de los modelos de material tiene una aplicación en específico, por lo cual deben analizarse cada uno de los modelos de material y así obtener cuál es el correcto dentro de los más de 40 modelos de material con los que cuenta ANSYS LS-DYNA. Dentro de las consideraciones más importantes es que el sistema presenta un comportamiento no lineal.

Definición de la geometría

Dependiendo de la dificultad del sistema, es el tiempo el cual se le emplea a este punto. Puede ser rápido o muy tardado, dependiendo la complejidad. El punto importante en la geometría es el hacer las figuras de manera regular, evitando esquinas y formar irregulares, esto debido a que el siguiente paso es crítico para un análisis correcto de elemento finito. Un punto importante en la geometría, es el apoyo por parte de software especializados para el modelado en 3D, debido a que el paquete con el cual cuenta ANSYS APDL para la creación de geometrías es muy básico y limitado para superficies. La importación de geometrías es un punto muy crucial, ya que de no hacer las geometrías de manera correcta en los paquetes de modelado, se tendrían problemas en la importación de los modelos.

Mallado del modelo

Este es, quizás, el punto de mayor problema y mayor peso para un correcto análisis de elemento finito. Es la base de que los resultados sean correctos y tengan la mayor exactitud posible a la realidad. Uno de los puntos importantes es tener en cuenta cuales son los puntos de importancia por parte del analista, esto se da con la experiencia. Una malla adecuada es aquella que cuenta con elementos de tamaño uniforme y formas regulares.

Una malla fina no quiere decir que es la mejor. Aunque se tendría una distribución de esfuerzos más detallada sobre el sistema, no siempre es lo mejor, debido a que se debe poner en una balanza entre la distribución de esfuerzos contra el tiempo de cómputo. Supongamos un análisis con 5,000 elementos, en el cual la malla no es tan fina, pero tampoco tan burda, el tiempo de cómputo podría ser de 12 horas y los resultados tienen un error del 8%; supongamos una malla burda con 1,000 elementos y con un tiempo de cómputo de 1 hora, pero un error del 25%; para finalizar, supongamos una malla de 20,000 elementos con un tiempo de cómputo de 60 horas, pero con un error del 2% a la realidad. Aquí se puede poner en una balanza cuales son los resultados y el tiempo con el cual deben de analizarse los problemas, esto debido a que si es un proyecto en la industria y se pide un análisis rápido, pero confiable, el análisis con 1,000 puede presentarse, pero teniendo en cuenta el error, aunque lo confiable sería el análisis de 5,000 al tener un mejor comportamiento y un tiempo de cómputo no tan elevado.

Definición de contactos

El tipo de contacto que se usa entre los elementos depende del fenómeno que se desea modelas, y así mismo de las características de la malla sobre la superficie de contacto.

Es un punto importante, ya que se establecen los coeficientes de fricción necesarios para el análisis. Los tipos de contacto se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Tipos de contactos entre superficies [31]

	SUPERFICIES SIMPLES	NODOS A SUPERFICIES	SUPERFICIE A SUPERFICIE
GENERAL (NORMAL)	SS	NTS	STS, OSTS
AUTOMÁTICO	ASSC, AG, ASS2D	ANTS	ASTS
RÍGIDO		RNTR	ROTR
UNIDO		TDNS	TDSS, TSES
UNIDO CON FALLA		TNTS	TSTS
EROSIÓN	ESS	ENTS	ESTS
BORDE	SE		
ESTAMPADO		DRAWBEAD	
FORMADO		FNTS	FSTS, FOSS

De manera general los contactos de ANSYS LS-DYNA pueden manejarse de la siguiente manera:

- General: el contacto es establecido cuando una superficie de un cuerpo se toca a sí misma o a otro cuerpo. Es también fácil definir debido a que no se necesita un objetivo.
- “Automático”: cuando una superficie de un cuerpo tiene contacto con él mismo o con otro cuerpo, es fácil de usar por que no se necesita un objetivo. A diferencia del contacto general, el automático orienta automáticamente las superficies de contacto para elementos planos.
- Nodos a superficies: cuando un nodo de contacto penetra una superficie de objetivo. Este tipo es comúnmente usado para contacto general entre dos superficies y más eficientemente con una superficie pequeña en contacto con una más grande.
- Superficie a superficie: cuando una superficie de un cuerpo penetra la superficie de otro. Este tipo es comúnmente usado por cuerpos arbitrarios que tienen grandes áreas de contacto y es muy efectivo para cuerpos que experimentan grandes cantidades de deslizamiento con fricción.

- Erosión: son usadas cuando las superficies de elementos sólidos fallan y el contacto necesita ser redefinido con los elementos internos restantes.
- Contacto de cuerpos rígidos: es normalmente usado para dinámica multi-cuerpo. Se vale de una curva de fuerza-deflexión para resistir penetración más allá que una rigidez lineal.
- Unido con falla: usado para definir cuando el contacto falla cuando las superficies están pegadas.
- Estampado: típicamente usado en casos especializados donde se requiere la operación de estampado. Es usado para la restricción de un

Aplicación las cargas al sistema

Una vez que se tienen las geometrías malladas con los modelos de materiales diferentes para cada uno de ellos, es necesario crear las partes, ya que ellas son las que nos van a definir cuáles son las cargas que se definen, así como definir los parámetros para poder tener unas variables de tiempo contra la variable de entrada, como puede ser carga o desplazamiento.

En este punto deben de tomarse en cuenta las restricciones del sistema, esto quiere decir que hay cuerpos los cuales no se mueven, como podría ser una mesa de trabajo o el herramiental inferior de una prensa. Están deben tener un desplazamiento cero, o de lo contrario el software puede darles un valor por default.

Como puntos importantes a considerar al momento de aplicar las cargas son los siguientes:

- Cuando un cuerpo rígido rota, no pueden utilizarse acoplamientos
- Vigilar que los nodos acoplados no generen momento en el análisis

3.3.2. Revisión de resultados

Una vez que han sido realizados todos los pasos anteriores, ANSYS LS-DYNA nos arroja los resultados que son obtenidos a través de sus iteraciones. Este punto es el que tiene mayor énfasis para un analista, debido a que si la geometría, el mallado y las cargas fueron erróneas, el analista tiene la certeza de decir donde fue el error; caso contrario, de que los resultados sean correctos, el analista puede dar con certeza su veredicto y decir que el modelado por elemento finito fue creado de manera correcta y los resultados

tienen validez. Para su análisis existen dos softwares que nos ayudan a visualizar los esfuerzos de nuestro sistema: el mismo ANSYS LS-DYNA y el software de LS-Prepost, el cual tiene una interfaz más fácil y con mayor comodidad que el ANSYS.

3.4. Simulación de probetas de compresión

En relación a lo presentado en los puntos anteriores del capítulo, debe plantearse un modelo de elemento finito para la simulación del proceso de compresión de probetas.

Los puntos principales que deben seguirse son los siguientes:

- Geometría
- Tipo de elemento y constantes reales
- Modelo de material
- Malla
- Contactos
- Desplazamiento de herramiental
- Análisis de resultados

3.4.1. Geometría

En la compresión de cilindros, son necesarias tres geometrías, por lo que la simulación cuenta con:

1. Herramental inferior: es la base del sistema, lugar de colocación de la probeta. No tiene movimiento
2. Probeta: es la pieza metálica que se va a deformar para obtener sus propiedades mecánicas, así como su comportamiento.
3. Herramental superior: es la pieza que ejerce presión sobre la probeta y la deforma.

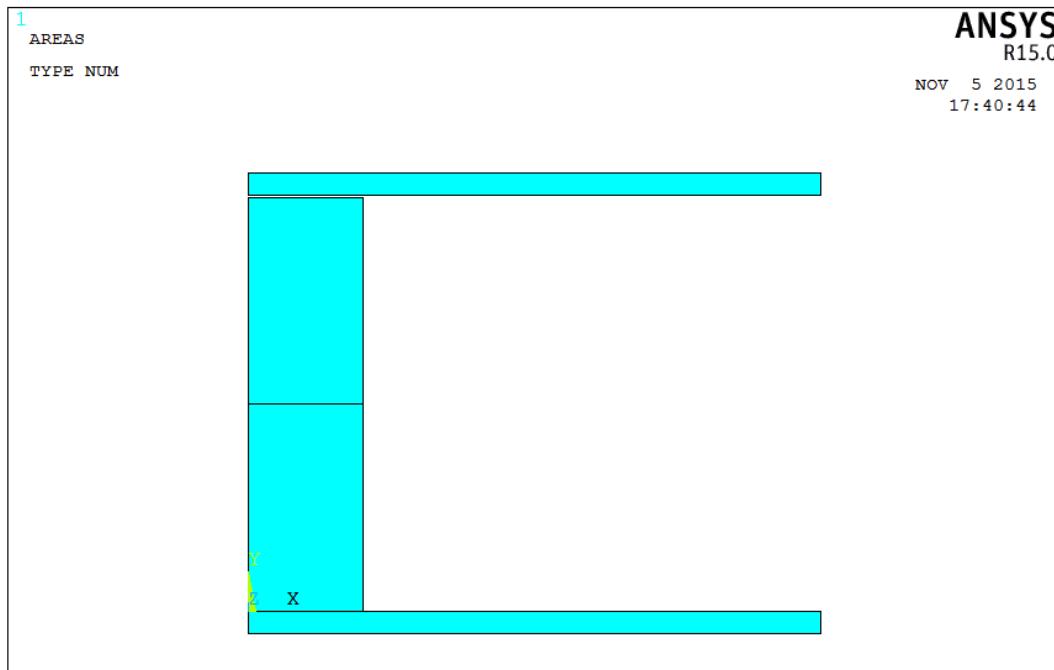


Figura 3.5. Geometría de la simulación 2D

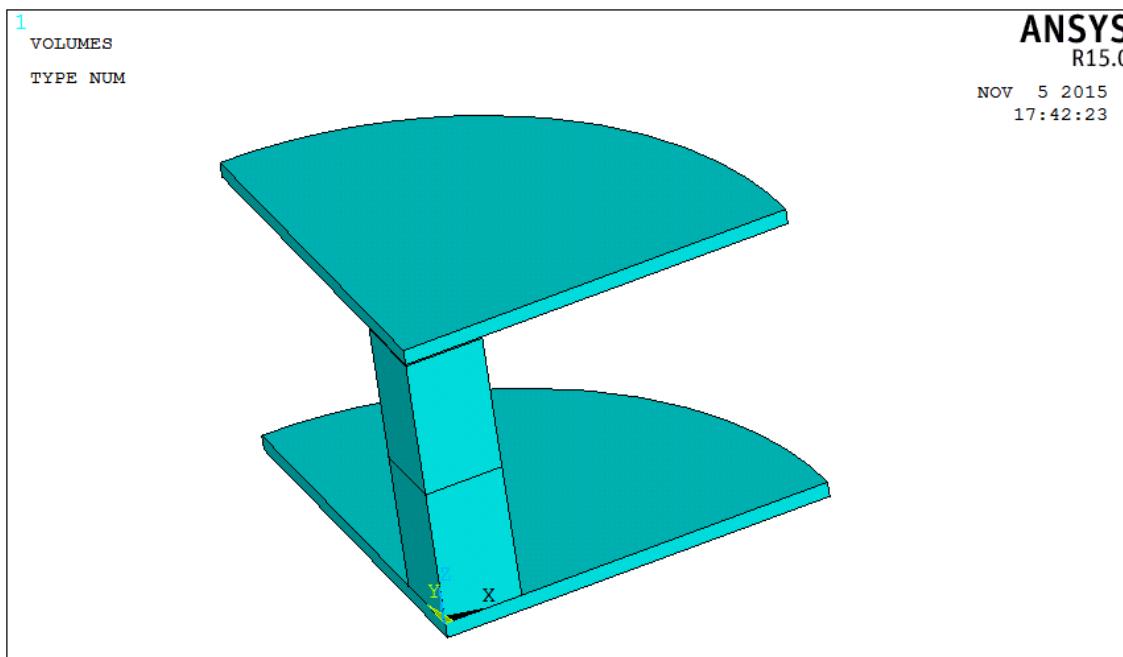


Figura 3.6. Geometría de la simulación 3D

En el caso de la simulación 2D, el análisis se hace axisimétrico, por lo cual con la geometría mostrada, el software hace una revolución con respecto al eje Y. En la simulación 3D, no se requiere todo hacer todo el sistema, con $\frac{1}{4}$ parte es suficiente, esto debido a las condiciones posteriores de simetría.

Al ser geometrías sencillas, son cilindros, se modelan en el software de ANSYS, por lo que no se requiere una importación por parte de algún software de modelado 3D.

Las unidades deben ser consistentes, esto se puede observar con el comando “/units, SI”, lo que nos muestra las unidades del sistema internacional, ver figura 3.7.

```
SI UNITS SPECIFIED FOR INTERNAL
LENGTH      <L> = METER <M>
MASS        <M> = KILOGRAM <KG>
TIME         <t> = SECOND <SEC>
TEMPERATURE  <T> = KELVIN <K>
TOFFSET      <O> = 0.0 KELVIN
CHARGE       <Q> = COULOMB
FORCE        <F> = NEWTON <N> <KG-M/SEC2>
HEAT          <H> = JOULE <N-M>

PRESSURE      = PASCAL <NEWTON/M**2>
ENERGY        <W> = JOULE <N-M>
POWER         <P> = WATT <N-M/SEC>
CURRENT       <i> = AMPERE <COULOMBS/SEC>
CAPACITANCE   <C> = FARAD
INDUCTANCE    <L> = HENRY
MAGNETIC FLUX = WEBER
RESISTANCE    <R> = OHM
ELECTRIC POTENTIAL = VOLT
```

Figura 3.7. Unidades del Sistema Internacional en ANSYS

Las unidades con las cuales se modelan las geometrías son:

- Herramental inferior: 25mm de radio x 1mm de alto
- Probeta: 5mm de radio x 18mm de alto
- Herramental superior: 25mm de radio x 1mm de alto

3.4.2. Tipos de elementos y constantes reales

Para el análisis en 2D se usa un elemento PLANE162, con la opción de axi-simetría, como se muestra en la figura 3.8.

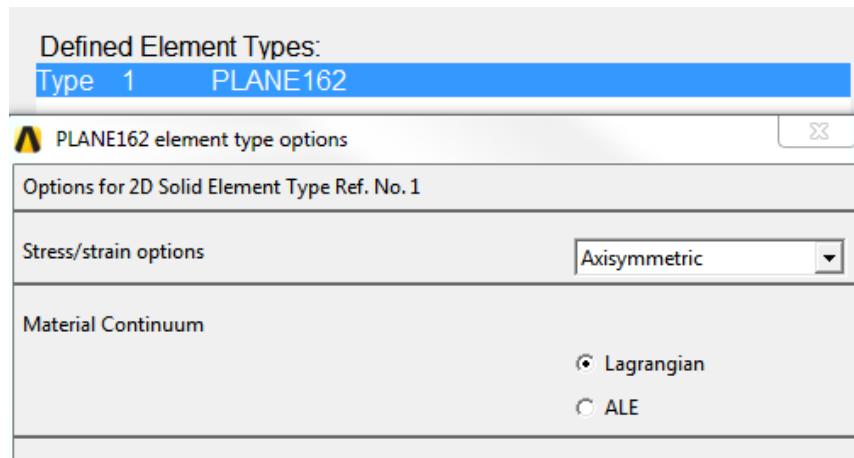


Figura 3.8. Tipo de elemento para análisis 2D

Para el análisis en 3D se usa un elemento SOLID164 con integración reducida, como se muestra en la figura 3.9.

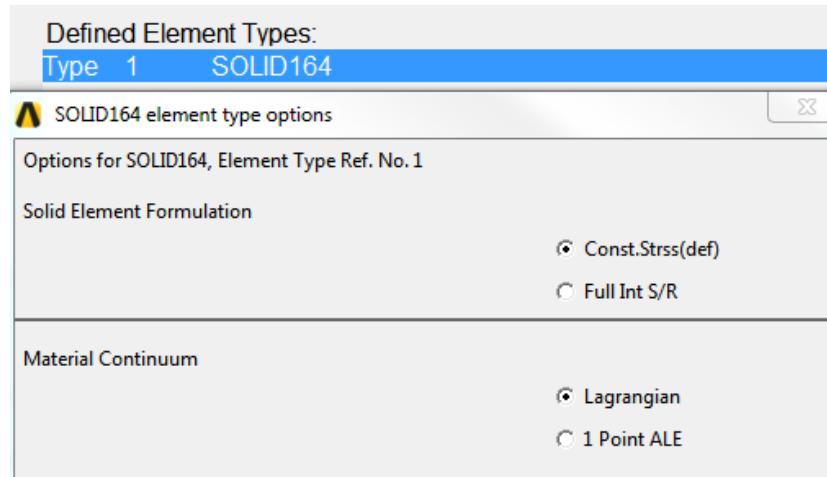


Figura 3.9. Tipo de elemento para análisis 3D

3.4.3. Modelo de material

En los casos, 2D y 3D, se usan elementos rígidos para los herramientales, cada uno con sus restricciones correspondientes, esto suponiendo que no tienen desgaste y no se deforman. Para las probetas se usa un modelo de material *Bilinear isotropic*, el cual es usado para análisis de grandes deformaciones. En nuestro caso, nuestro material se deforma hasta un 65% de la altura total, por lo cual son grandes deformaciones.

Para el modelo *bilinear isotropic*, nos pide las propiedades mostradas en la figura 3.10.

DENS	0
EX	0
NUXY	0
Yield Stress	0
Tangent Modulus	0

Figura 3.10. Propiedades del modelo de material

El gradiente de temperatura cambia las propiedades mecánicas de nuestro acero, por lo cual no podemos trabajar con los valores obtenidos en tablas.

Densidad

Para la densidad se hace un análisis de cambio de volumen con respecto a la temperatura. El volumen específico de una unidad puede ser expresado por la ecuación 3.3.:

$$v = 1/\rho = V/m \quad (3.3)$$

Donde

v = Volumen específico [m³/kg]

ρ = densidad [kg/m³]

V = Volumen de la unidad [m³]

m = masa de la unidad [kg]

El cambio de esta unidad de volumen cuando cambia la temperatura, puede ser expresado por la ecuación 3.4.:

$$dV = V_0\beta(t_1 - t_0) \quad (3.4)$$

Donde:

$dV = V_1 - V_0$ = Cambio de volumen [m³]

β = Coeficiente de expansión volumétrica por temperatura [m³/m³°C]

t_1 = temperatura final (°C)

t_0 = temperatura inicial (°C)

Por lo que el cambio de la densidad con respecto a la temperatura puede ser expresado por la fórmula 3.5.:

$$\rho_1 = \rho_0[1 + \beta(t_1 - t_0)] \quad (3.5.)$$

Donde

ρ_1 = densidad final [kg/m³]

ρ_0 = densidad inicial [kg/m³]

En el caso del material empleado en esta investigación el coeficiente de expansión volumétrica es de: 32.4x10⁻⁶ [1/°C].

Con cada uno de los valores, obtenemos la siguiente de tabla 3.2. de densidades con respecto a la temperatura:

Tabla 3.2. Cambio de densidad con respecto a la temperatura

TEMPERATURA (°C)	DENSIDAD [KG/M ³]
1000	7791.804
1100	7790.998
1200	7790.192
1300	7788.58

Módulo de elástico

En la literatura se encuentra poco material acerca del cambio de módulo elástico con respecto a la temperatura; sin embargo, fue posible encontrar los valores del cambio de módulo elástico con respecto a la temperatura hasta los 649°C, por lo que se hizo una regresión en el programa de Excel para encontrar una fórmula que nos permitiera predecir sus valores. Los valores se encuentran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Cambio de módulo elástico con respecto a la temperatura [32]

TEMPERATURA (°C)	MÓDULO ELÁSTICO [GPA]
-200	215.116484
-129	210.979628
-73	206.842773
21	202.016441
93	197.19011
149	193.74273
204	189.605875
260	186.847971
316	182.711116
371	174.437405
427	165.474218
482	153.063652
538	139.274134
593	123.416188
649	106.17929

Obtenemos la gráfica de la figura 3.11, la cual contiene la ecuación de regresión con un binomio de segundo grado.

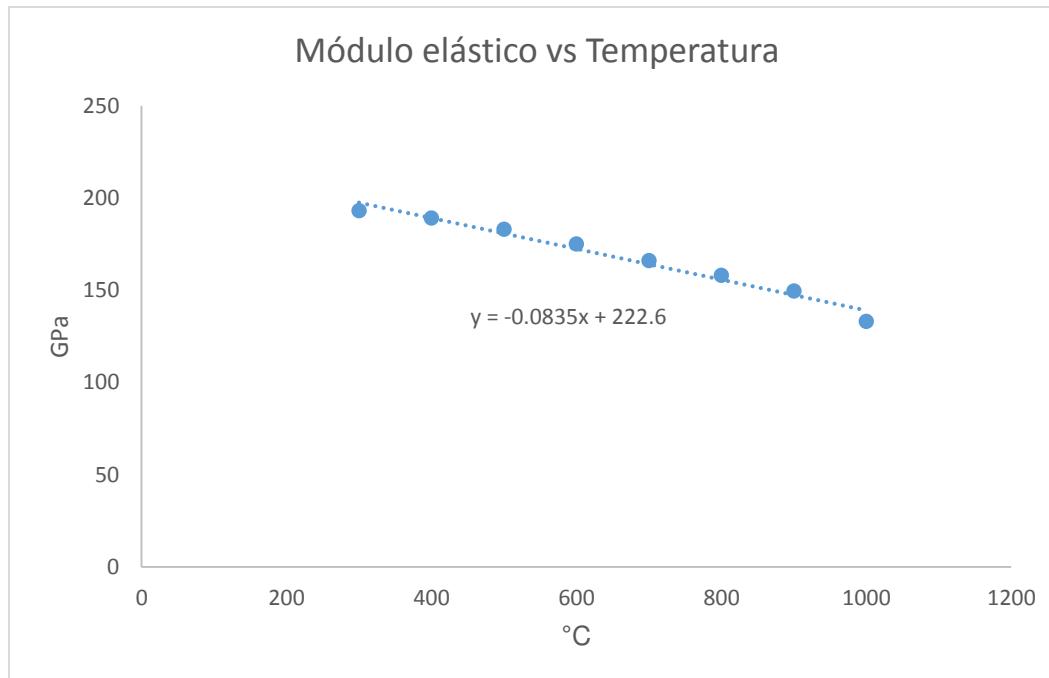


Figura 3.11. Módulo elástico vs Temperatura

Con la ecuación de regresión, obtenemos los valores de módulo elástico contra temperatura para las condiciones de simulación.

Tabla 3.4. Módulo elástico contra temperatura con respecto a temperatura en condiciones de forja en caliente.

TEMPERATURA (°C)	MÓDULO ELÁSTICO [GPA]
1000	132.98
1100	120.38
1200	106.78
1300	92.18

Coeficiente de Poisson

El coeficiente de Poisson es otra variable que cambia con respecto al gradiente de temperatura. En la bibliografía se pudo encontrar un artículo en el cual hacen referencia

a una forma experimental para obtener el coeficiente de Poisson a diferentes temperaturas. Debe tenerse en cuenta que el coeficiente de Poisson no puede ser superior a 0.5. Lo que denota un coeficiente de 0.5 es que el material es incompresible, lo cual lo volvería líquido, por lo que se estaría hablando de que está a la temperatura de fusión. Al tener valores cercanos a la temperatura de fusión, se supondría que tendrían valores cercanos a 0.5, pero sin llegar a serlo.

Los valores de los coeficientes de Poisson se encuentran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Coeficiente de Poisson con respecto a la temperatura [33]

TEMPERATURA (°C)	COEFICIENTE DE POISSON
1000	0.43
1100	0.44
1200	0.45
1300	0.46

Esfuerzo de cedencia

El esfuerzo de cedencia, es el esfuerzo en el cual el sistema pasa de la zona elástica a la zona plástica. Estos valores se toman en referencia a las gráficas obtenidas por parte de Tecnalia, por lo tanto los valores obtenidos se encuentran en la tabla 3.6. Cada tasa de deformación y cada temperatura tienen valores de esfuerzo de cedencia diferente.

Tabla 3.6. Esfuerzo de cedencia con respecto a 1000°C, 1100°C, 1200°C y 1300°C

TASA DE DEFORMACIÓN	ESFUERZO DE CEDENCIA	ESFUERZO DE CEDENCIA	ESFUERZO DE CEDENCIA	ESFUERZO DE CEDENCIA
	[MPA] 1000°C	[MPA] 1100°C	[MPA] 1200°C	[MPA] 1300°C
1S-1	8.0000E+07	5.2000E+07	4.5000E+07	3.2000E+07
5S-1	1.2000E+08	7.0000E+07	6.0000E+07	4.2000E+07
15S-1	1.3000E+08	8.5000E+07	8.0000E+07	4.5000E+07
30S-1	1.5000E+08	1.0500E+08	1.0000E+08	5.0000E+07

Módulo tangente

Para el módulo tangente, se hace uso de la fórmula de la pendiente, descrita en la fórmula 3.6.:

$$E_{tan} = \frac{\sigma_u - \sigma_y}{\varepsilon_u - \varepsilon_y} \quad (3.6.)$$

Donde:

E_{tan} = Módulo tangente [MPa]

σ_u = esfuerzo último [MPa]

σ_y = esfuerzo de cedencia [MPa]

ε_u = deformación última

ε_y = deformación de cedencia

En la tabla 3.7 se muestran los valores del módulo tangente para cada una de las tasas de deformación y diferentes temperaturas.

Tabla 3.7. Módulo tangente a 1000°C, 1100°C, 1200°C y 1300°C

TASA DE DEFORMACIÓN	TAN MOD	TAN MOD	TAN MOD	TAN MOD
	[MPA] 1000°C	[MPA] 1100°C	[MPA] 1200°C	[MPA] 1300°C
1S-1	7.0175E+07	3.1580E+07	2.6320E+07	2.6320E+07
5S-1	5.2632E+07	7.0170E+07	5.2630E+07	4.9120E+07
15S-1	7.8947E+07	1.0484E+08	6.2510E+07	5.6450E+07
30S-1	8.7719E+07	8.3300E+07	5.5550E+07	6.1400E+07

Con los datos, hasta ahora establecidos, se tienen las propiedades mecánicas del acero a las diferentes Condiciones de operación; i.e., temperatura y tasas de deformación.

Por su parte, los herramientales en el modelo de elementos finitos son considerados como componentes rígidos; es decir, no cambian sus propiedades con respecto al gradiente de temperatura. Dicho esto, las propiedades mecánicas requeridas para un modelo de material rígido consideradas en este análisis, son las mostradas en la figura 3.12.

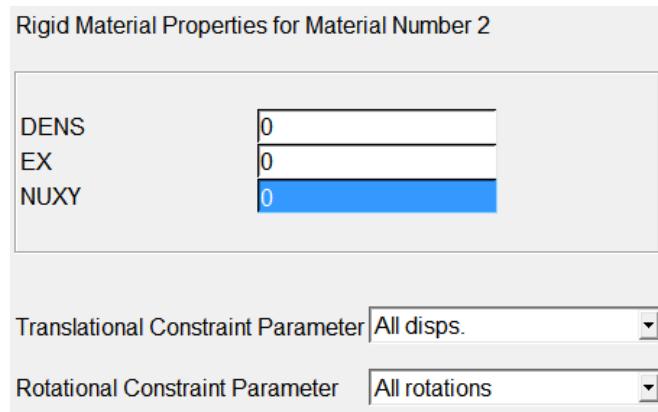


Figura 3.12.- Propiedades mecánicas de un modelo de material rígido

Las propiedades mecánicas del material del herramiental son las mostradas en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Propiedades mecánicas del TZM [34]

PROPIEDADES	VALOR
DENSIDAD	1.0022e+4 [kg/m ³]
MÓDULO DE ELASTICIDAD	3.20e+11 [Pa]
COEFICIENTE DE POISSON	0.31

Los grados de libertad de traslación y rotación deben restringirse de la siguiente manera descrita:

- Para el herramiental superior en 2D las restricciones de traslación son en el eje X y Z, y de rotación en todas las direcciones.
- Para el herramiental inferior en 2D las restricciones de traslación son en los tres ejes y de rotación en todas las direcciones.
- Para el herramiental superior en 3D las restricciones de traslación son en el eje X y, y de rotación en todas las direcciones.
- Para el herramiental inferior en 3D las restricciones de traslación son en los tres ejes y de rotación en todas las direcciones.

3.4.4. Mallado

Un punto fundamental es el mallado, esto debido a que un buen mallado da buenos resultados.

Para el modelo 2D, la probeta se divide en 30 elementos de alto por 10 elementos de radio. La razón de espaciamiento de las líneas de alto es de 0.5, esto con la finalidad de dar una mayor densidad de elementos en los extremos, zona donde sucede el *folding* o doblez, además de ser la zona con mayor concentración de esfuerzos.

Los herramientales se dividen en 20 partes iguales con 2 divisiones por altura, como se muestra en la figura 3.13.

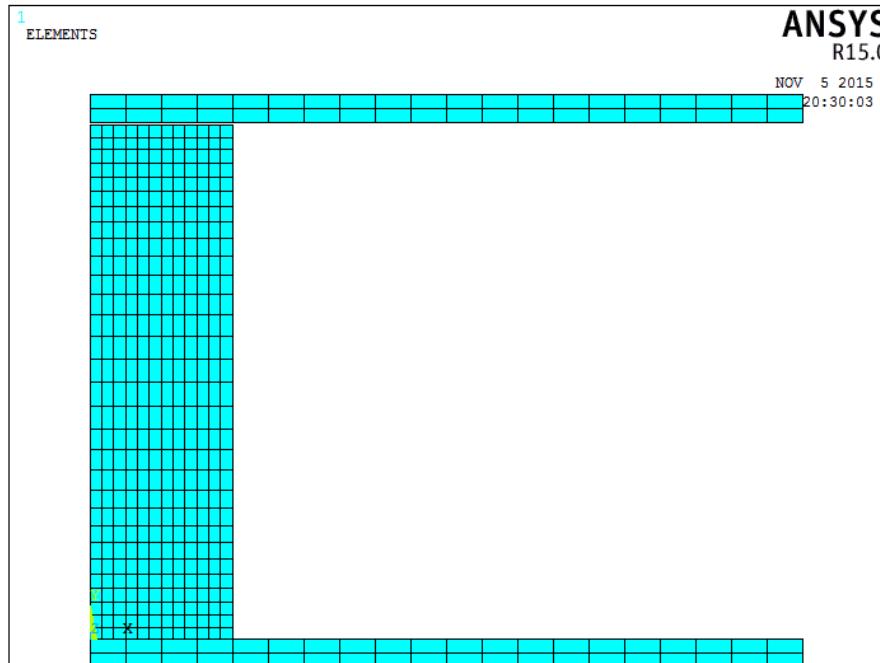


Figura 3.13.- Mallado de sistema en 2D

Para el modelo 3D, la probeta se divide en 40 elementos de alto por 16 elementos de radio. La razón de espaciamiento de las líneas de alto es de 0.5, esto con la finalidad de dar una mayor densidad de elementos en los extremos, zona donde sucede el *folding* o doblez, además de ser la zona con mayor concentración de esfuerzos.

Los herramientales se dividen en 80 partes iguales con 3 divisiones por altura. Esto con la finalidad de evitar penetración de nodos, como se muestra en la figura 3.14.

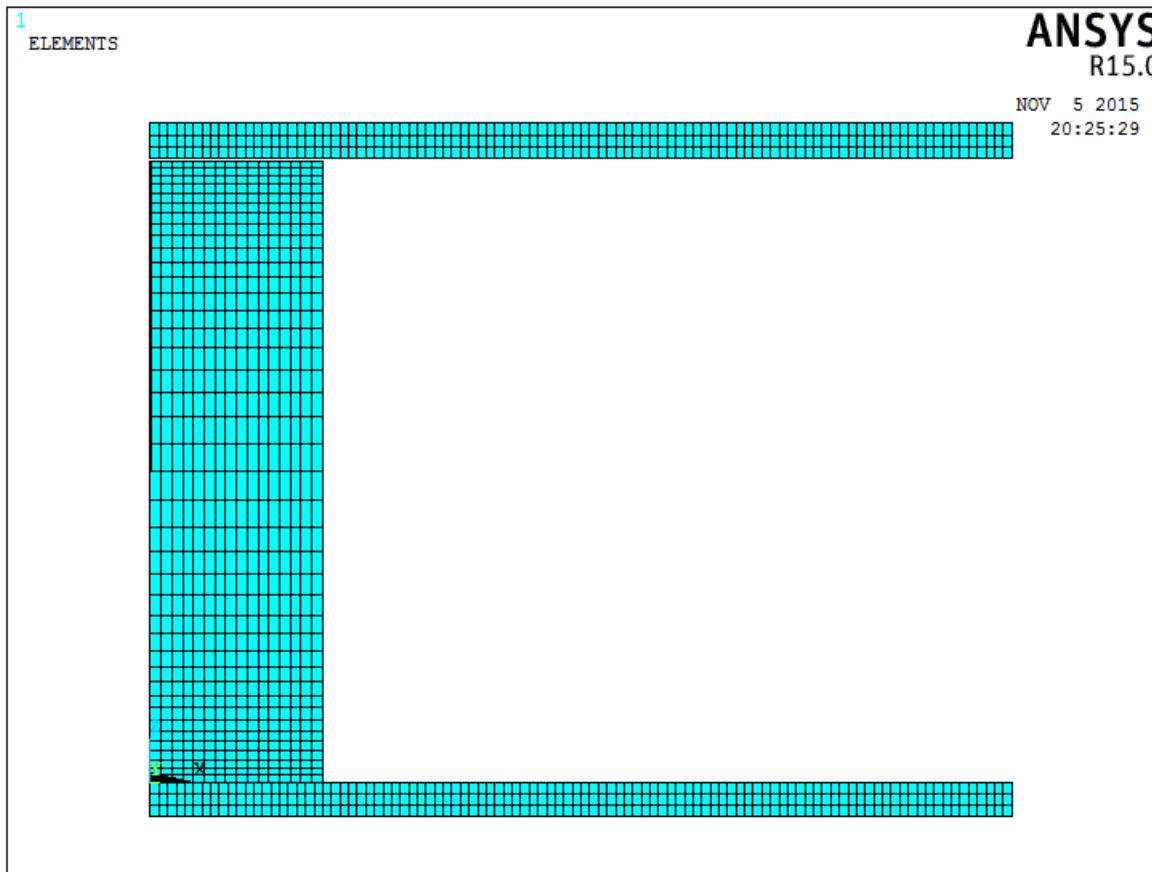


Figura 3.14. Mallado de sistema en 3D

3.4.5. Contactos

Como se mencionó al inicio del capítulo, existen contactos de diferentes tipos para cada uno de los elementos. La selección de los contactos define el tiempo de cómputo y la seguridad de no obtener errores.

Para la simulación 2D el único contacto capaz de generar una deformación es el ASS2D, el cual es *Automatic 2D single Surface contact*. En la forja en caliente, el valor del coeficiente de fricción estático va de 0.3 a 0.4, por lo que se toma el valor óptimo, siendo el de 0.3.

Para la simulación 3D se toma un contacto automático, el cual es ASTS, esto por su simplicidad de operación y resultados correctos en pruebas. El coeficiente de fricción también es de 0.3, ver figura 3.15.

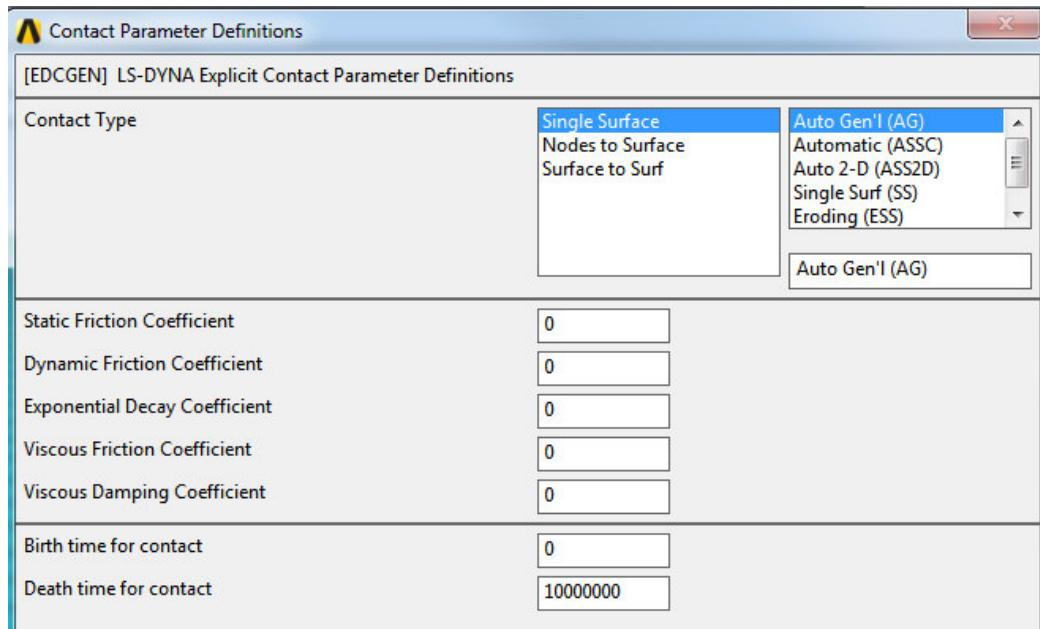


Figura 3.15. Opciones de contacto en ANSYS

3.4.6. Aplicar las cargas al sistema

Para aplicar las cargas al sistema, se requiere hacer un arreglo de parámetros, los cuales van a ser de tiempo y desplazamiento.

Para el desplazamiento, se toma que la probeta mide 18mm y se deforma un 65%, obteniendo un desplazamiento de 11.7mm. Todas las probetas van a deformarse lo mismo.

Para el tiempo, se debe considerar el tiempo de operación a cada tasa de deformación. El tiempo de deformación de cada probeta viene dado por la fórmula 3.7 [35].

$$t = \frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}} \quad (3.7)$$

Donde

t = tiempo de deformación [s]

ε = deformación

$\dot{\varepsilon}$ = tasa de deformación [1/s]

Por la fórmula 3.6. pueden obtenerse los tiempos de operación de las probetas, obteniendo los tiempos mostrados en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Tiempos de prueba con respecto a la tasa de deformación.

TASA DE DEFORMACIÓN [1/S]	TIEMPO [S]
1	0.65
5	0.13
15	0.0433
30	0.02166

Para el modelo en 2D, se hace un desplazamiento de un cuerpo rígido en la parte 3 en el eje Y, ver figura 3.16.

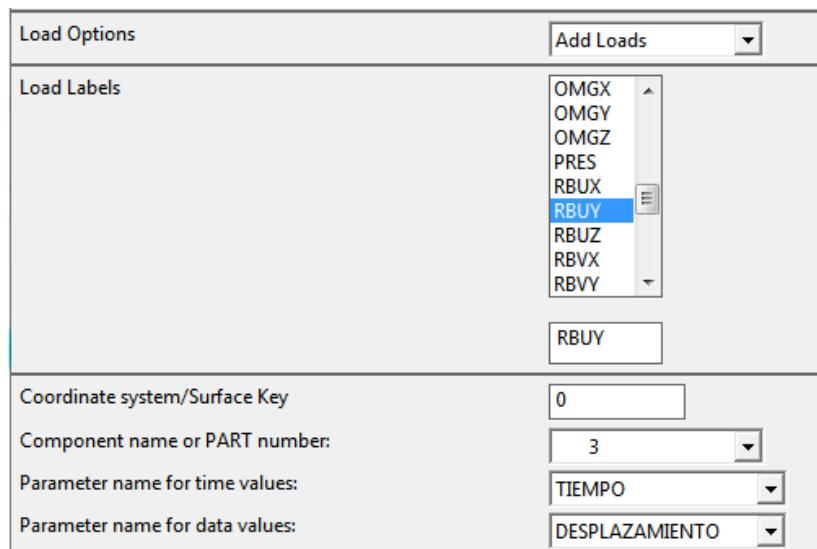


Figura 3.16. Desplazamiento del herramiental superior en 2D

Para el modelo en 3D, se hace un desplazamiento de un cuerpo rígido en la parte 3 en el eje Z, ver figura 3.17.

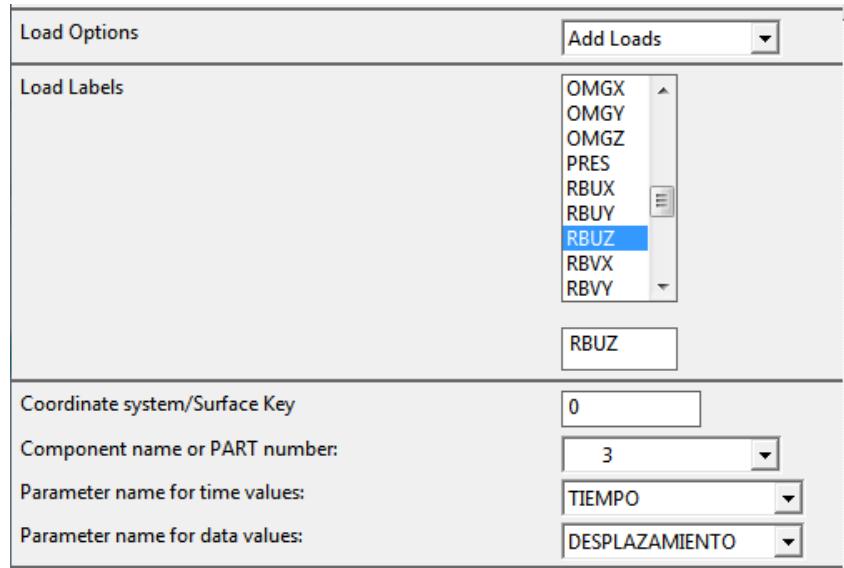


Figura 3.17. Desplazamiento del herramiental superior en 3D

Para los modelos de axisimetría y simetría deben restringirse las líneas y paredes que corresponden. Para el modelo 2D se restringe todo el movimiento en el eje X de las líneas que se encuentran en el $X=0$, además de restringir todas las áreas con respecto al eje Z, esto para evitar que exista una inconsistencia, ver figura 3.18.

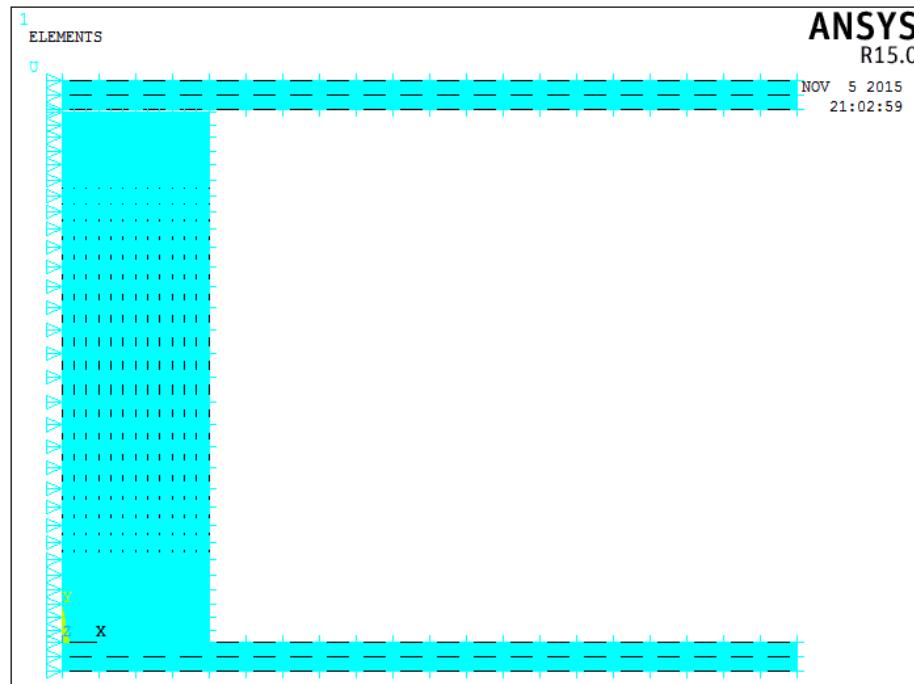


Figura 3.18. Condiciones de restricción para modelo 2D

Para el modelo 3D, deben restringirse las caras correspondientes a los ejes en los que se encuentran, ver figura 3.19.

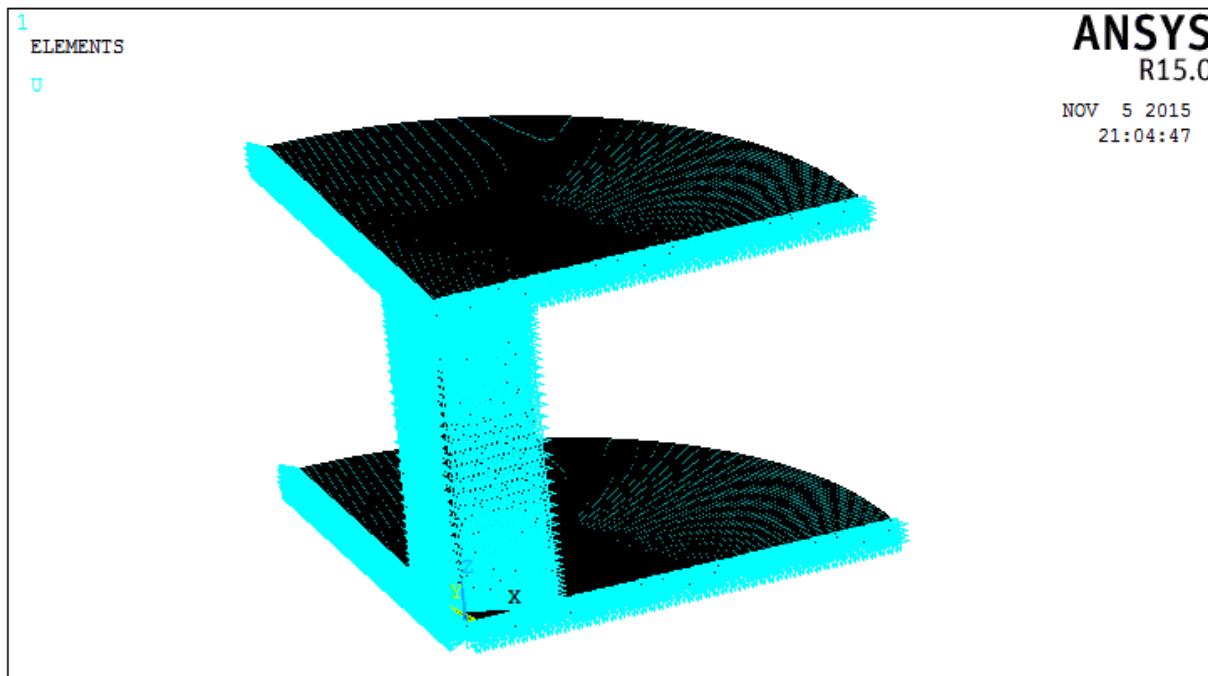


Figura 3.19. Condiciones de restricción para modelo 3D

ANÁLISIS DE RESULTADOS DE SIMULACIONES

4. Análisis de resultados de simulaciones

En el siguiente capítulo se hace un análisis de resultados de las simulaciones, tanto 2D como 3D, en el cual se analiza principalmente los esfuerzos de Von Mises en la superficie, zonas de posible fractura y el *barreling* de las probetas.

Una vez que se hace el modelo en ANSYS LS-DYNA se resuelve con el *solver* de ANSYS para LS-DYNA, el cual se usa para predecir el comportamiento de la probeta.

La ventaja que tiene la simulación es que no son necesarias las pruebas físicas y pueden hacerse tantas pruebas como sean necesarias antes de hacerse la parte experimental.

El costo entre el tiempo de cómputo y las pruebas experimentales es un punto crucial que le da una clara ventaja a las simulaciones, esto debido a que el gasto es menor para una simulación que para poner a punto una prueba experimental a base de prueba y error. Es por ello que una gran parte de las pruebas experimentales, hoy en día, pasan primero por un proceso de simulación por elemento finito.

Para la predicción de fallas se analiza la zona de *folding* de la probeta, mostrada en la figura 4.1, la cual es la zona en la cual la probeta se dobla sobre si y genera mayor cantidad de esfuerzos y posibles fracturas. Estos esfuerzos máximos deben obtenerse a través de experimentación, por lo cual deben hacerse pruebas con variación de lubricantes.

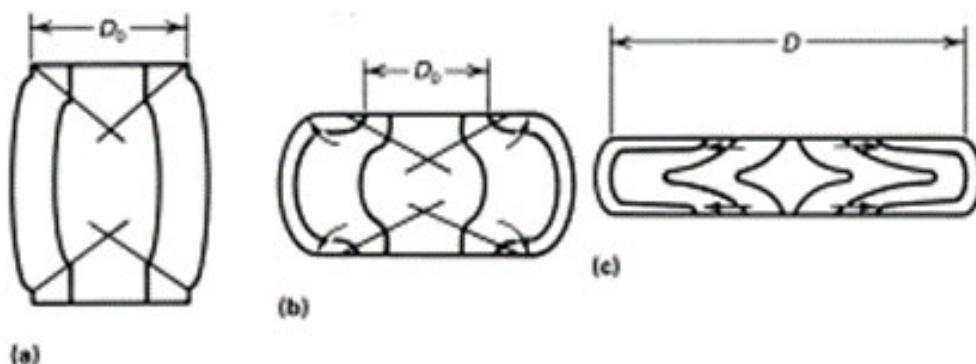


Figura 4.1.- Patrón de deformación en probeta, a) *barreling* inicial b) *barreling* y *folding*
c) Inicio y final de la expansión de la cara [23]

4.1. Simulación de probetas 2D

4.1.1. Temperatura 1000°C

4.1.1.1. Tasa de deformación de 1/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 146.7MPa en la figura 4.2.

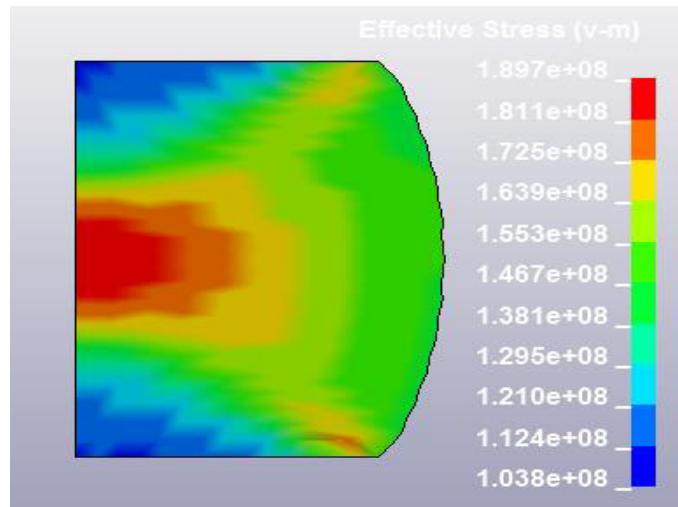


Figura 4.2 Esfuerzos de Von Mises en 1/s a 1000°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.3.

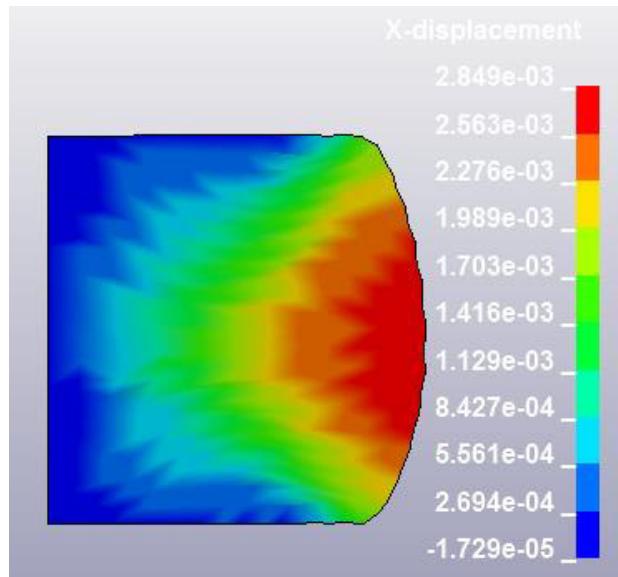


Figura 4.3 Coordenadas en X en 1/s a 1000°C

El valor del barreling es de: 3.44 mm

4.1.1.2. Tasa de deformación de 5/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 159.1 MPa en la figura 4.4.

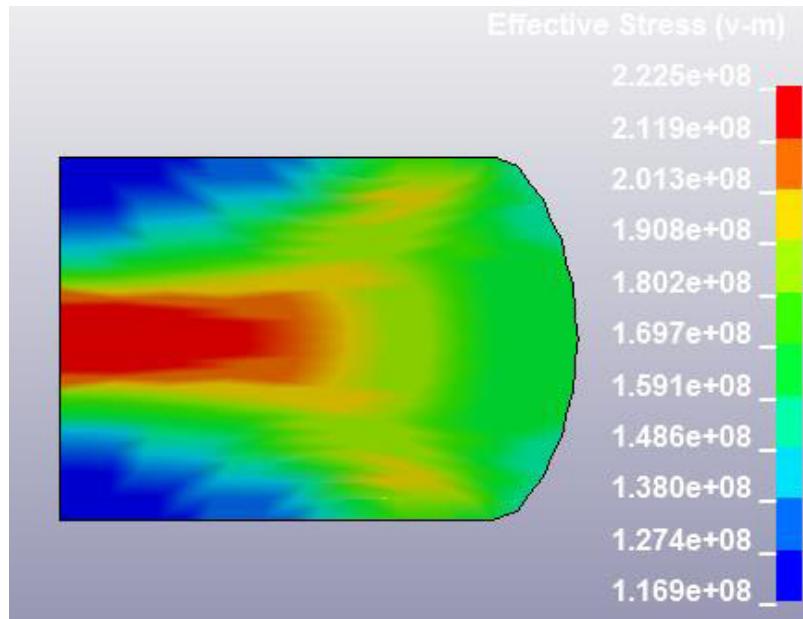


Figura 4.4 Esfuerzos de Von Mises en 5/s a 1000°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.5.

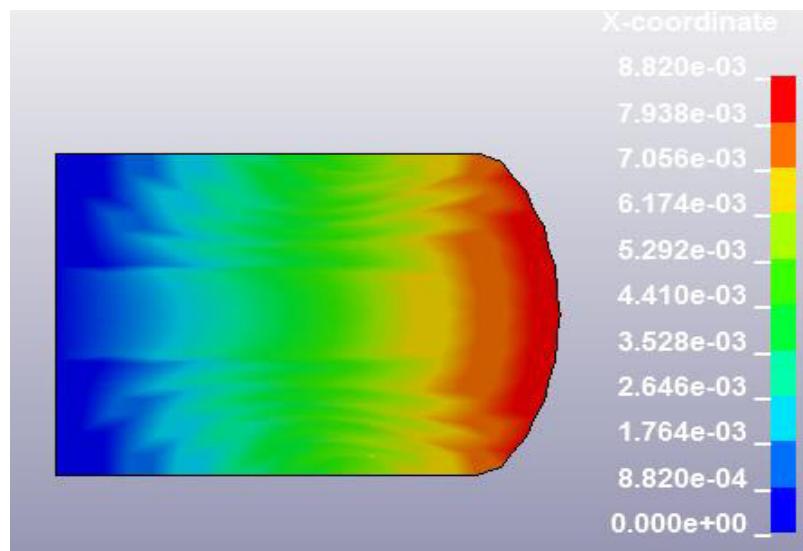


Figura 4.5 Coordenadas en X en 5/s a 1000°C

El valor del barreling es de: 3.528 mm

4.1.1.3. Tasa de deformación de 15/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 203.1 MPa en la figura 4.6.

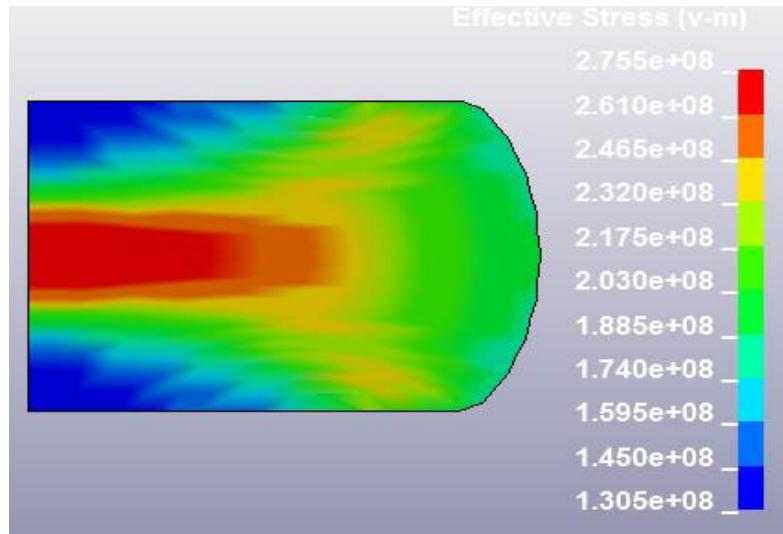


Figura 4.6 Esfuerzos de Von Mises en 15/s a 1000°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.7.

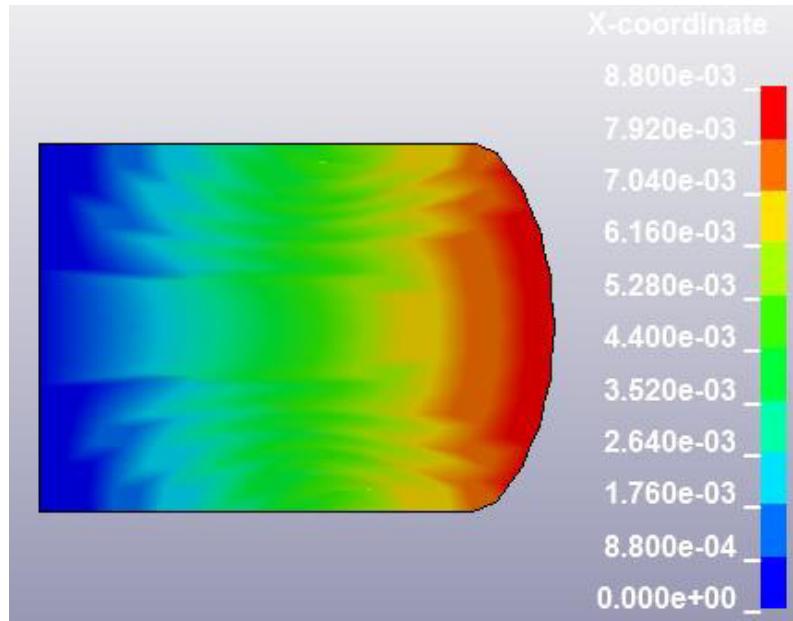


Figura 4.7 Coordenadas en X en 15/s a 1000°C

El valor del barreling es de: 3.52 mm

4.1.1.4. Tasa de deformación de 30/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 215.3MPa en la figura 4.8.

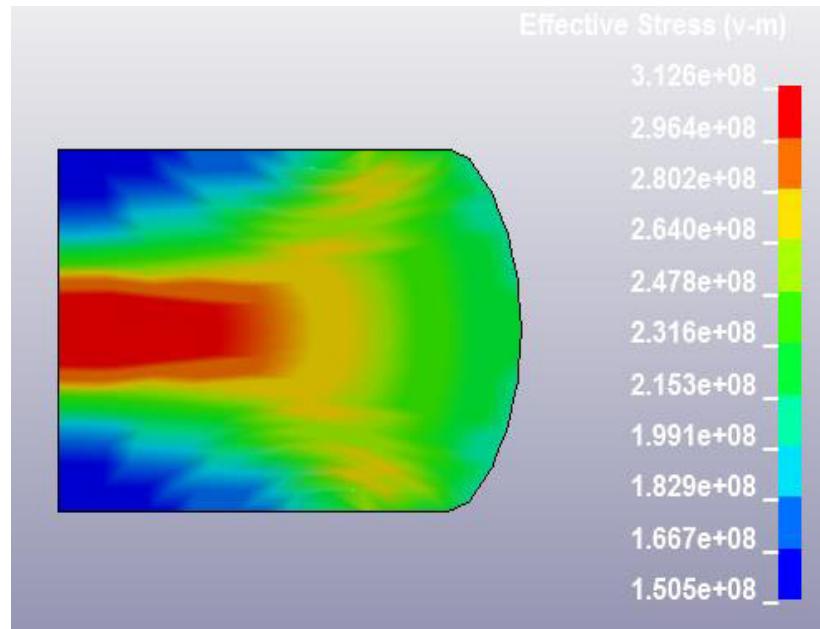


Figura 4.8. Esfuerzos de Von Mises en 30/s a 1000°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.9.

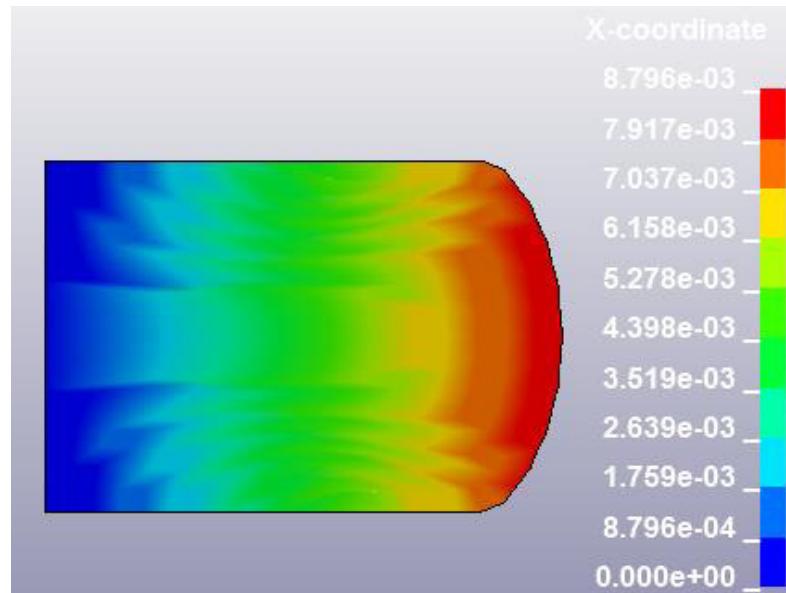


Figura 4.9 Coordenadas en X en 30/s a 1000°C

El valor del barreling es de: 3.518 mm

4.1.2. Temperatura 1100°C

4.1.2.1. Tasa de deformación de 1/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 215.3MPa en la figura 4.10.

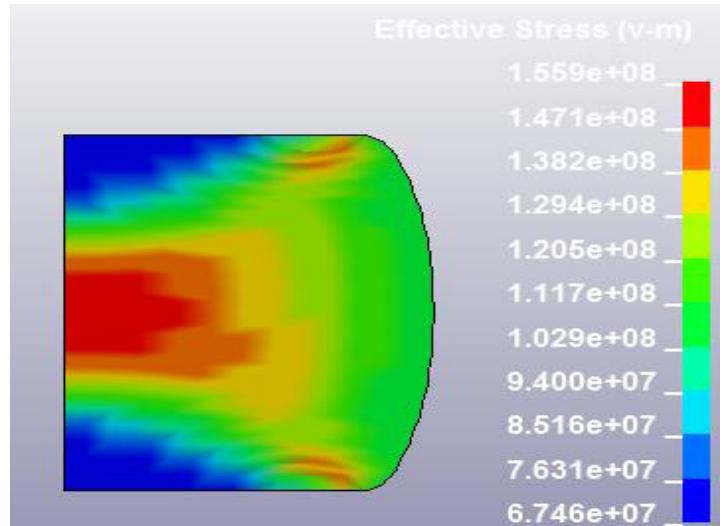


Figura 4.10 Esfuerzos de Von Mises en 1/s a 1100°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.11.

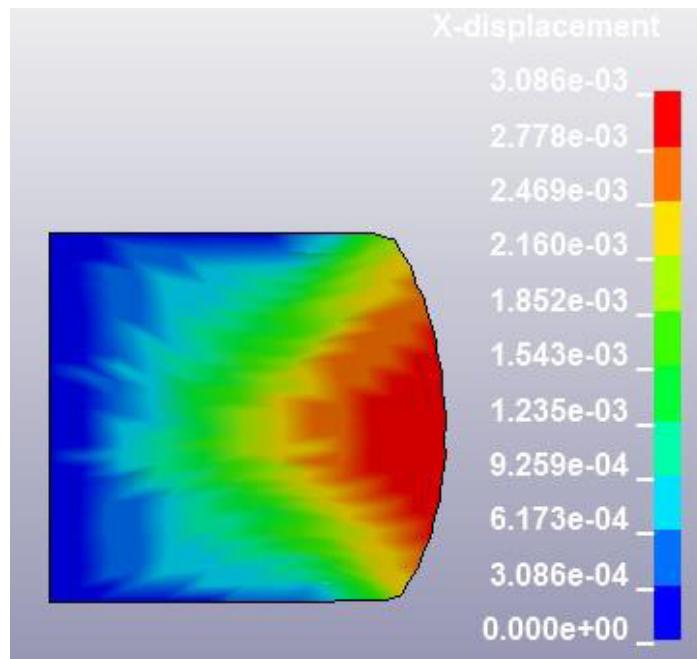


Figura 4.11 Coordenadas en X en 1/s a 1100°C

El valor del barreling es de: 3.52 mm

4.1.2.2. Tasa de deformación de 5/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 189.6 MPa en la figura 4.12.

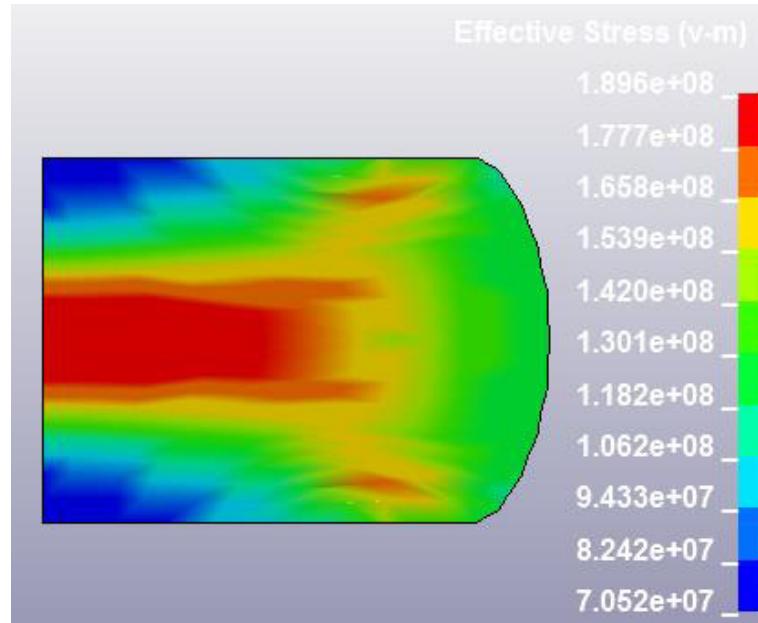


Figura 4.12 Esfuerzos de Von Mises en 5/s a 1100°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.13.

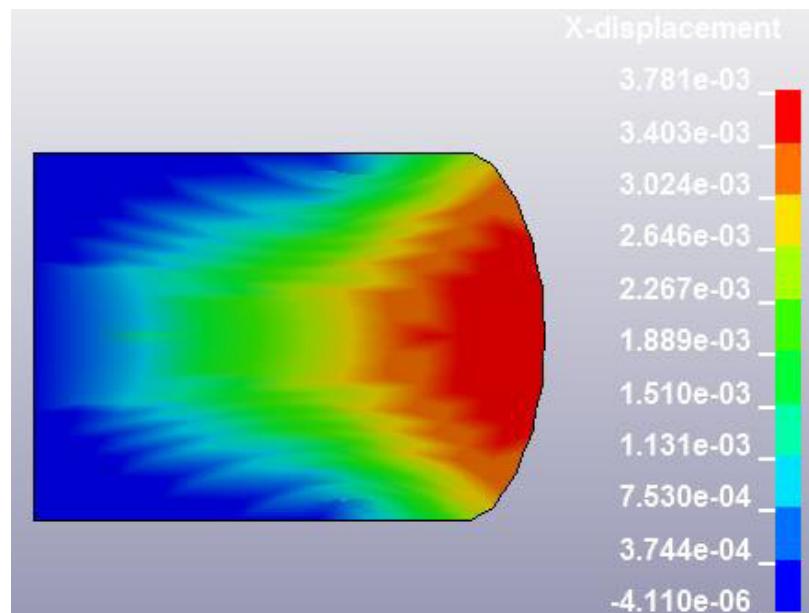


Figura 4.13 Coordenadas en X en 5/s a 1100°C

El valor del barreling es de: 3.028 mm

4.1.2.3. Tasa de deformación de 15/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 258.5 MPa en la figura 4.14.

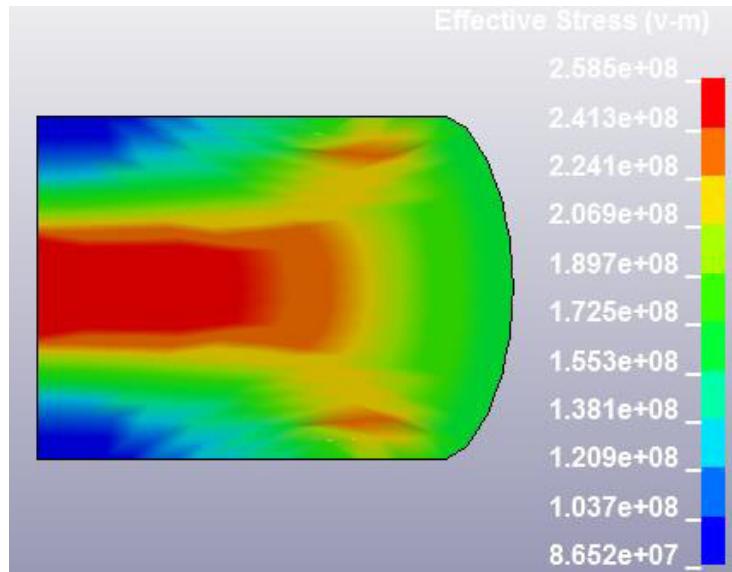


Figura 4.14 Esfuerzos de Von Mises en 15/s a 1100°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.15.

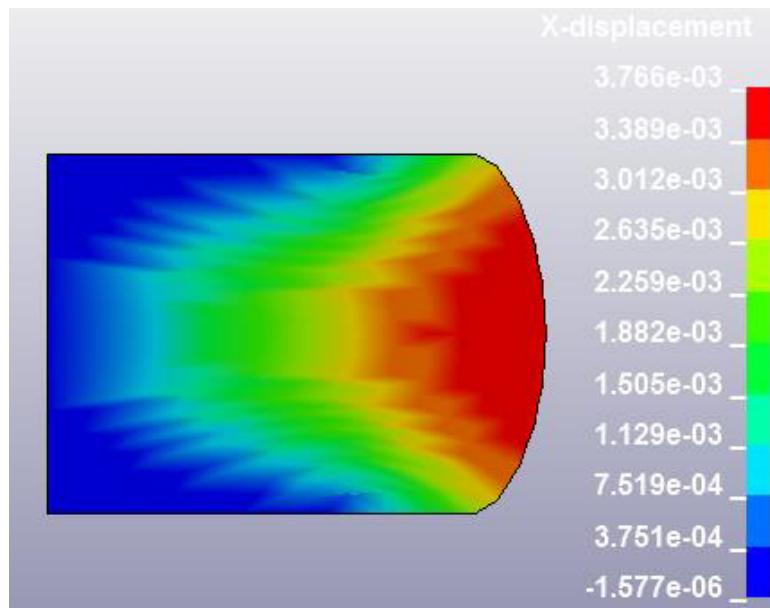


Figura 4.15 Coordenadas en X en 15/s a 1100°C

El valor del barreling es de: 3.014 mm

4.1.2.4. Tasa de deformación de 30/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 252.1 MPa en la figura 4.16.

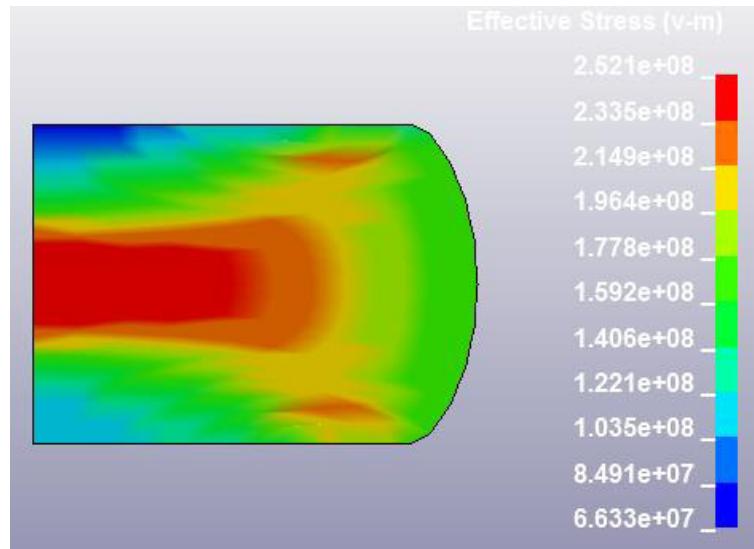


Figura 4.16 Esfuerzos de Von Mises en 30/s a 1100°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.17.

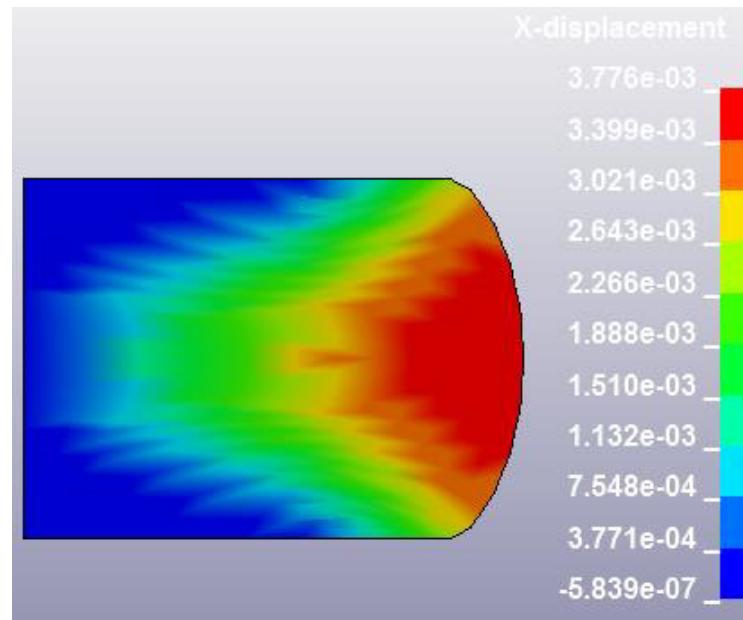


Figura 4.17 Coordenadas en X en 30/s a 1100°C

El valor del barreling es de: 3.02 mm

4.1.3. Temperatura 1200°C

4.1.3.1. Tasa de deformación de 1/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 89.1 MPa en la figura 4.18.

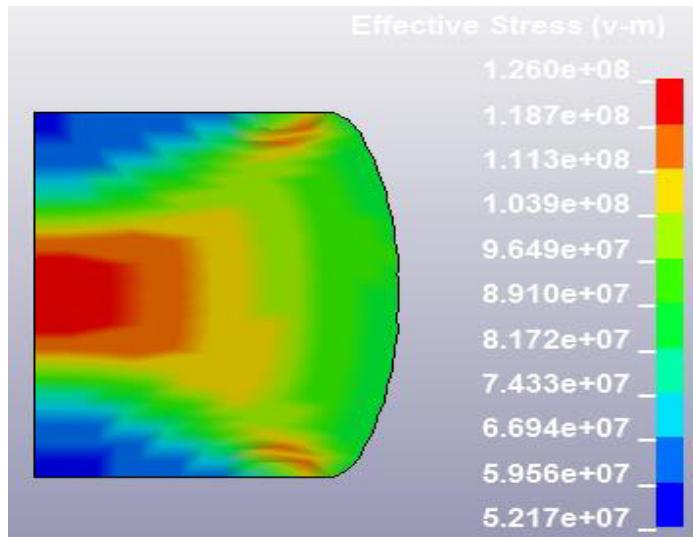


Figura 4.18 Esfuerzos de Von Mises en 1/s a 1200°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.19.

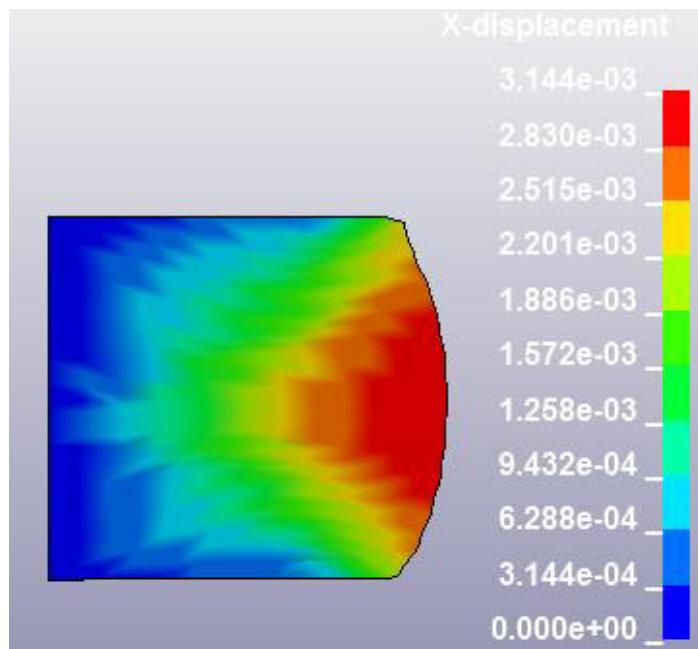


Figura 4.19 Coordenadas en X en 1/s a 1200°C

El valor del barreling es de: 3.144 mm

4.1.3.2. Tasa de deformación de 5/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 105.3 MPa en la figura 4.20.

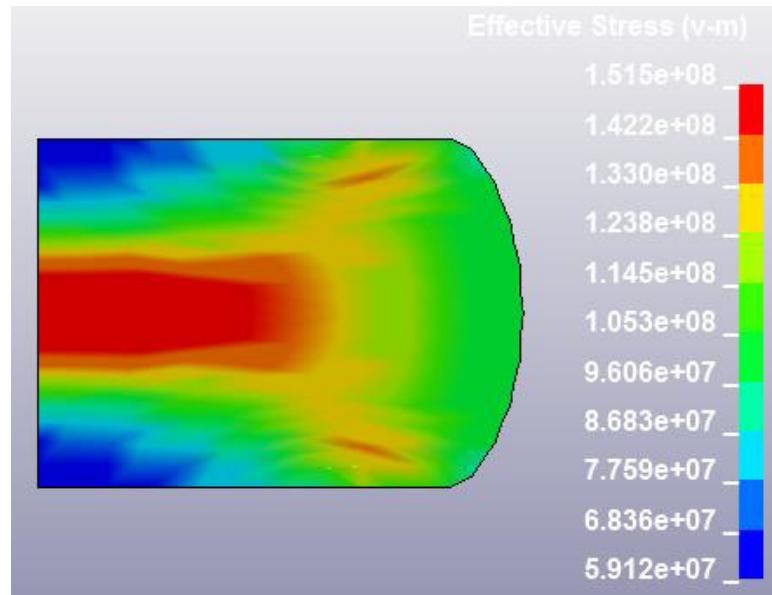


Figura 4.20 Esfuerzos de Von Mises en 5/s a 1200°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.21.

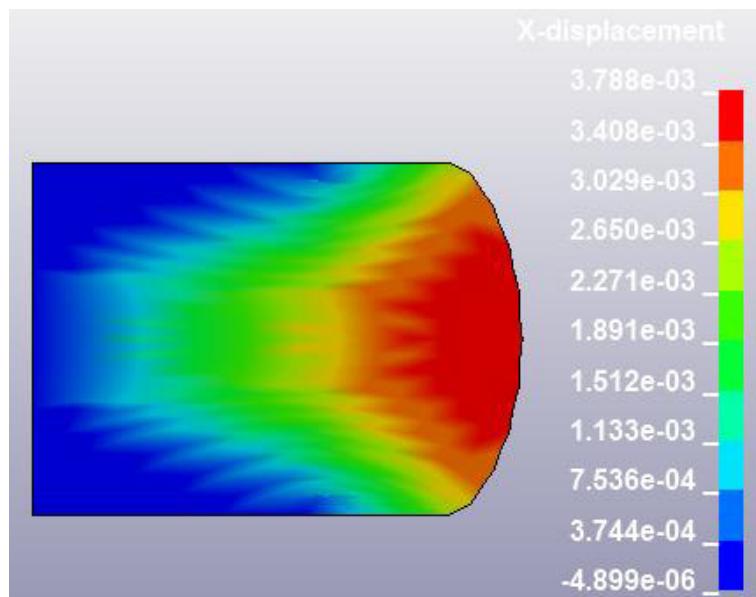


Figura 4.21 Coordenadas en X en 5/s a 1200°C

El valor del barreling es de: 3.02 mm

4.1.3.3. Tasa de deformación de 15/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 135.2 MPa en la figura 4.22.

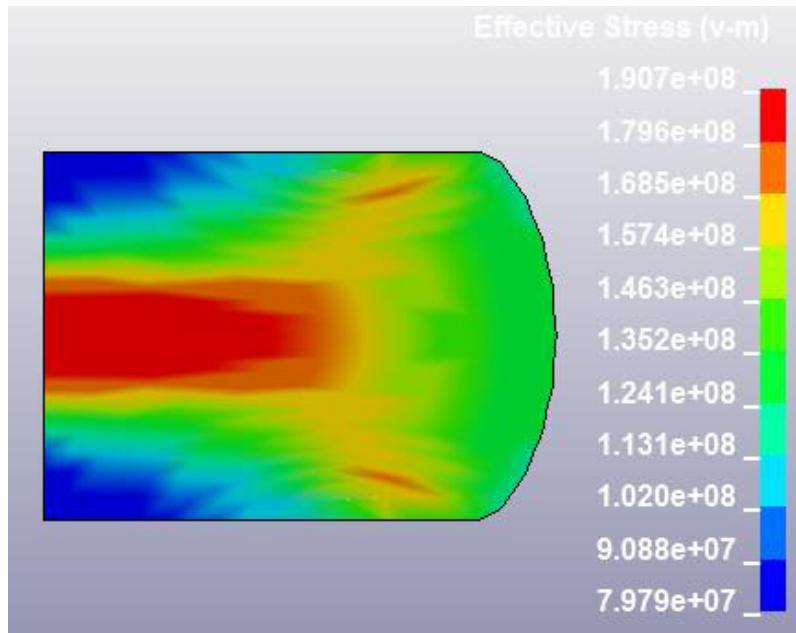


Figura 4.22 Esfuerzos de Von Mises en 15/s a 1200°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.23.

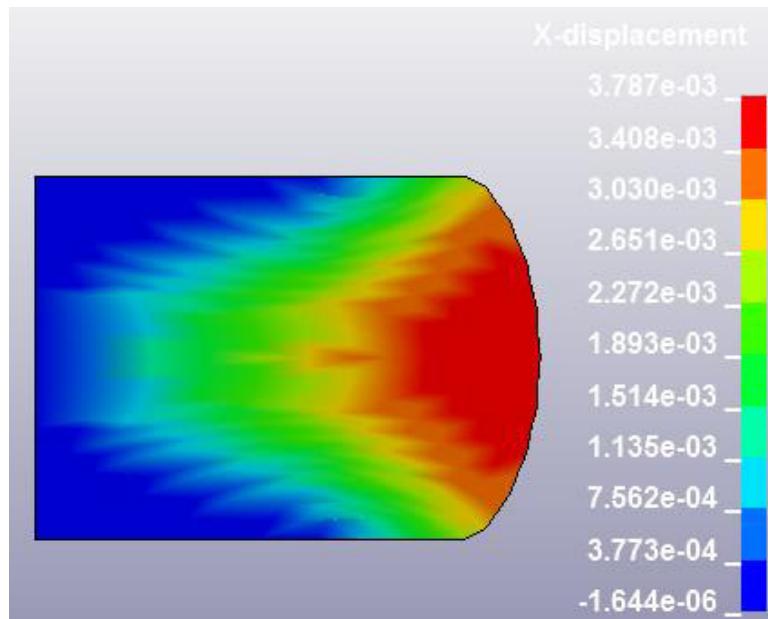


Figura 4.23 Coordenadas en X en 15/s a 1200°C

El valor del barreling es de: 3.03 mm

4.1.3.4. Tasa de deformación de 30/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 151.1 MPa en la figura 4.24.

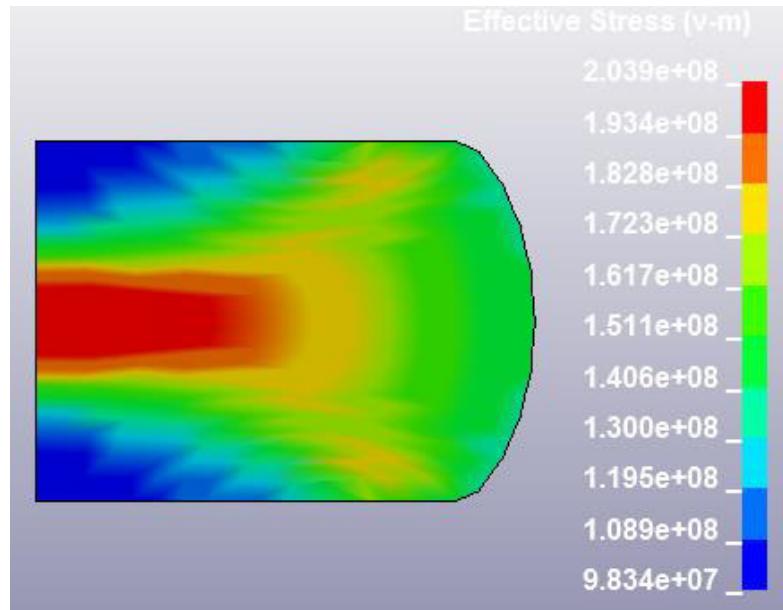


Figura 4.24 Esfuerzos de Von Mises en 30/s a 1200°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.25.

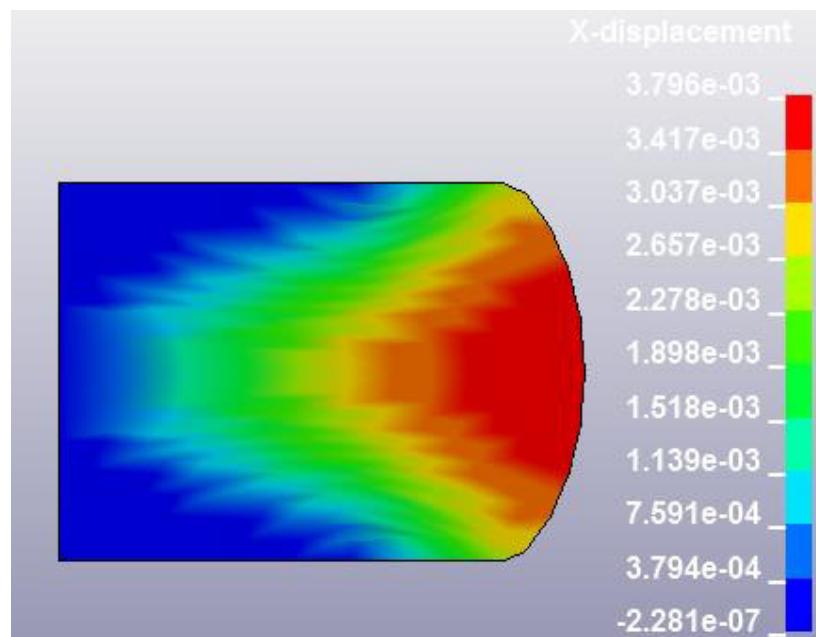


Figura 4.25 Coordenadas en X en 30/s a 1200°C

El valor del barreling es de: 3.036 mm

4.1.4. Temperatura 1300°C

4.1.4.1. Tasa de deformación de 1/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 63.8 MPa en la figura 4.26.

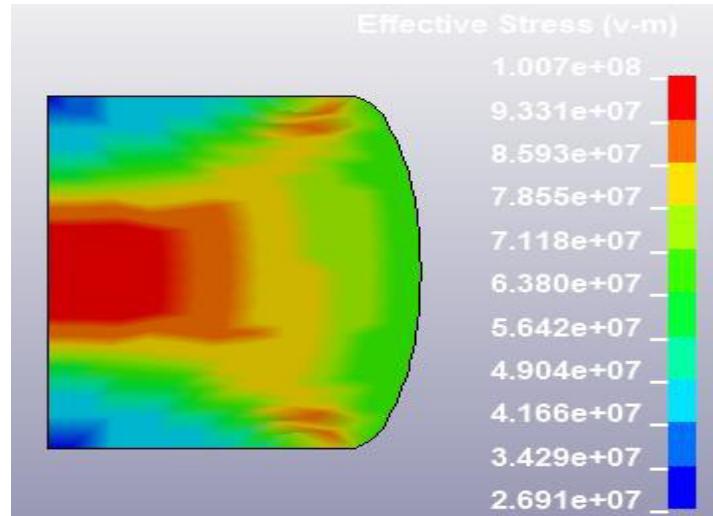


Figura 4.26 Esfuerzos de Von Mises en 1/s a 1300°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.27.

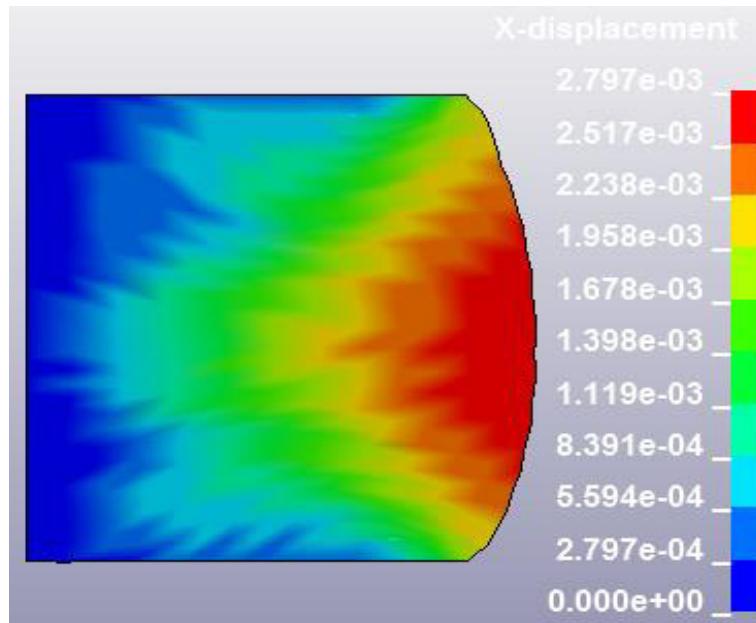


Figura 4.27 Coordenadas en X en 1/s a 1300°C

El valor del barreling es de: 3.356 mm

4.1.4.2. Tasa de deformación de 5/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta.

En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 81.1 MPa en la figura 4.28.

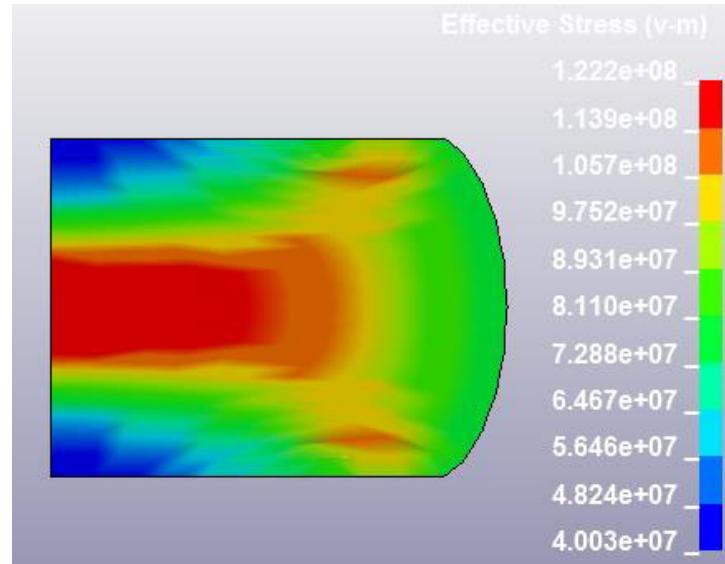


Figura 4.28 Esfuerzos de Von Mises en 5/s a 1300°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.29.

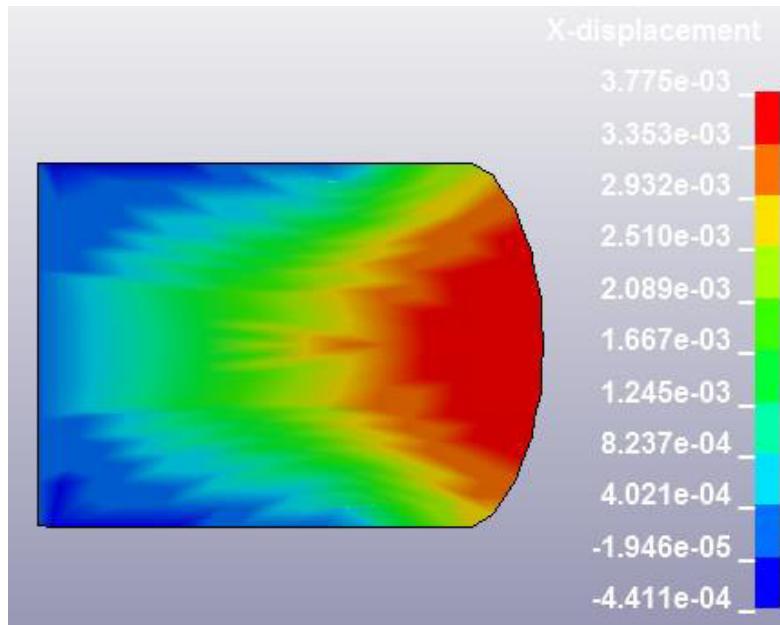


Figura 4.29 Coordenadas en X en 5/s a 1300°C

El valor del barreling es de: 3.372 mm

4.1.4.3. Tasa de deformación de 15/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 91.72 MPa en la figura 4.30.

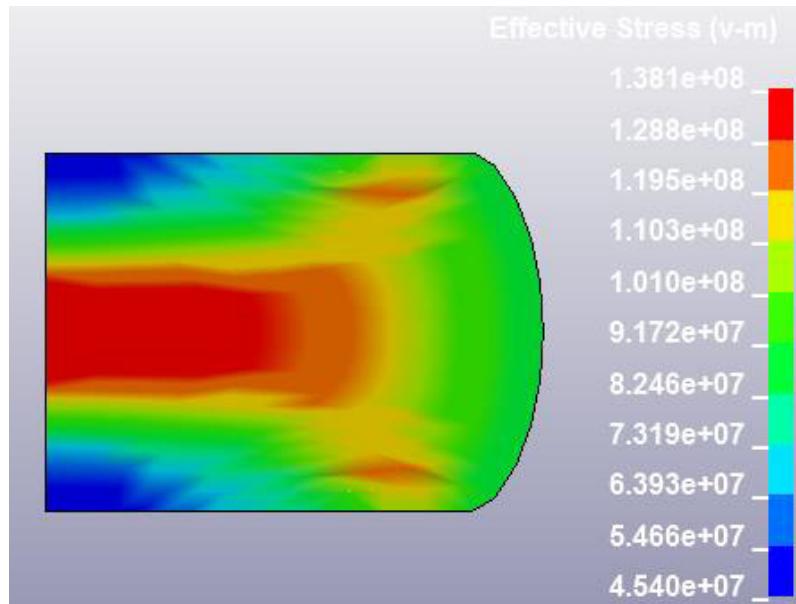


Figura 4.30 Esfuerzos de Von Mises en 15/s a 1300°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.31.

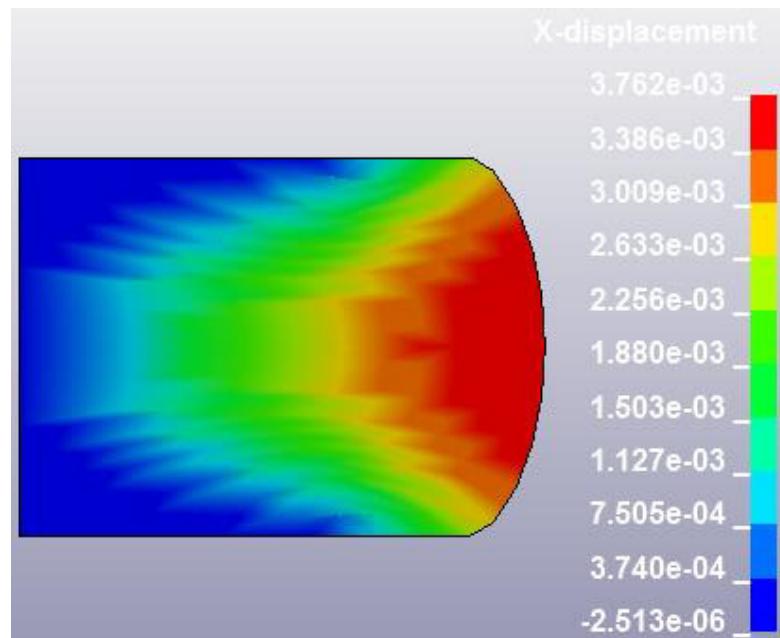


Figura 4.31 Coordenadas en X en 15/s a 1300°C

El valor del barreling es de: 3.012 mm

4.1.4.4. Tasa de deformación de 30/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta.

En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 151.5 MPa en la figura 4.32.

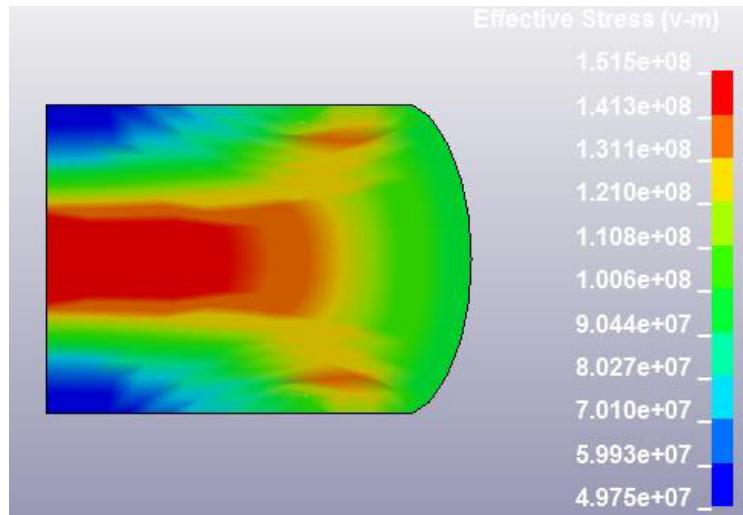


Figura 4.32 Esfuerzos de Von Mises en 30/s a 1300°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.33.

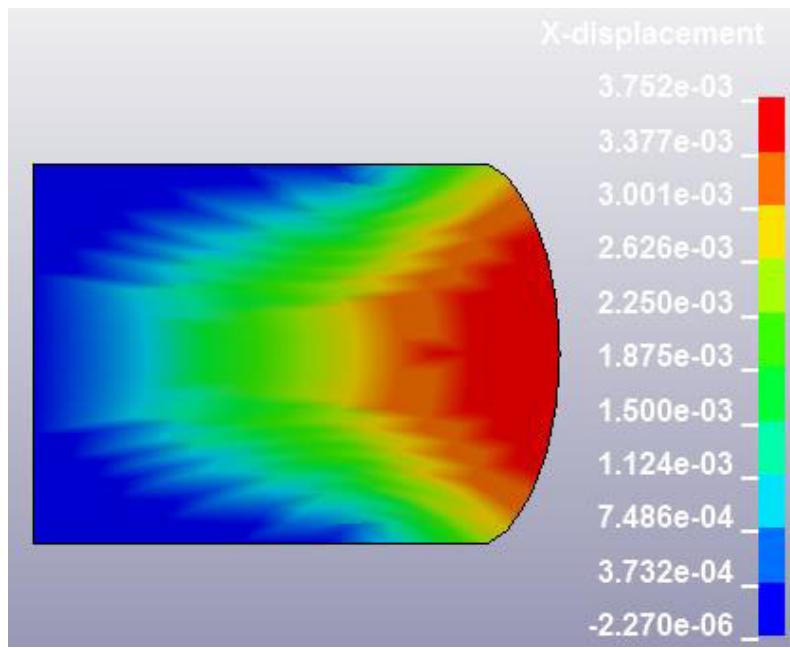


Figura 4.33 Coordenadas en X en 30/s a 1300°C

El valor del barreling es de: 3.004 mm

4.1.5. Sumario de resultados 2D

En la tabla 4.1 es mostrada la relación de los esfuerzos máximos en el exterior de la probeta, el esfuerzo en el *folding* y el *barreling* de la probeta.

TABLA 4.1.- Propiedades después de la prueba de compresión en 2D

PRUEBA	Barreling [mm]	Esfuerzo max ext [MPa]	Esfuerzo folding [MPa]
1_1000_2D	3.44	146.7	163.9
5_1000_2D	3.528	159.1	169.7
15_1000_2D	3.52	203.1	217.5
30_1000_2D	3.518	215.3	247.8
1_1100_2D	3.52	111.7	132.8
5_1100_2D	3.028	142	153.9
15_1100_2D	3.014	172.5	206.9
30_1100_2D	3.02	177.8	196.4
1_1200_2D	3.144	89.1	111.3
5_1200_2D	3.02	105.3	114.5
15_1200_2D	3.03	135.2	146.3
30_1200_2D	3.036	151.1	161.7
1_1300_2D	3.356	63.8	78.55
5_1300_2D	3.372	81.1	97.52
15_1300_2D	3.012	91.72	110.3
30_1300_2D	3.004	100.6	121

Este sumario de resultados de esfuerzo folding, esfuerzo exterior y barreling se representa de manera gráfica en las figuras 4.34, 4.35 y 4.36 respectivamente.

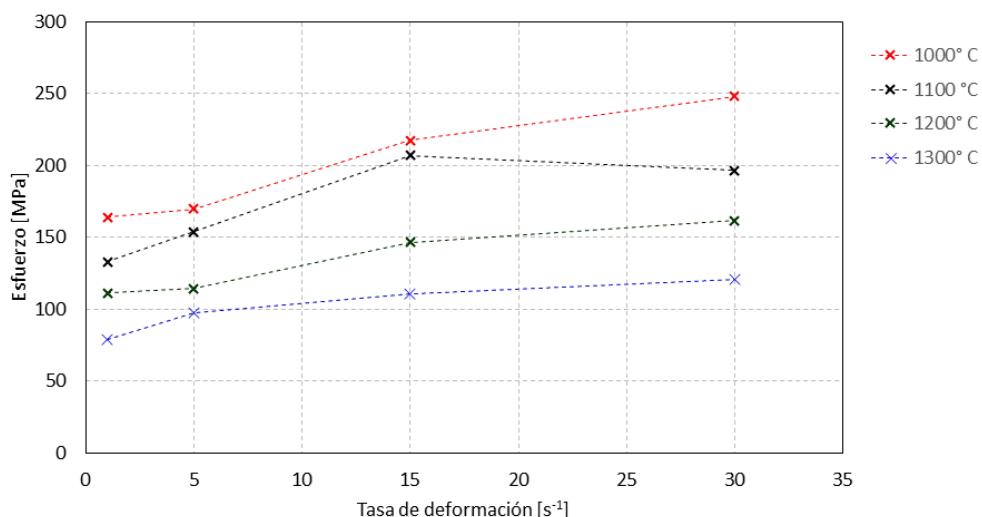


Figura 4.34. Esfuerzo folding para cada muestra en las condiciones de temperatura y tasa de deformación analizadas con el MEF en el modelo 2D.

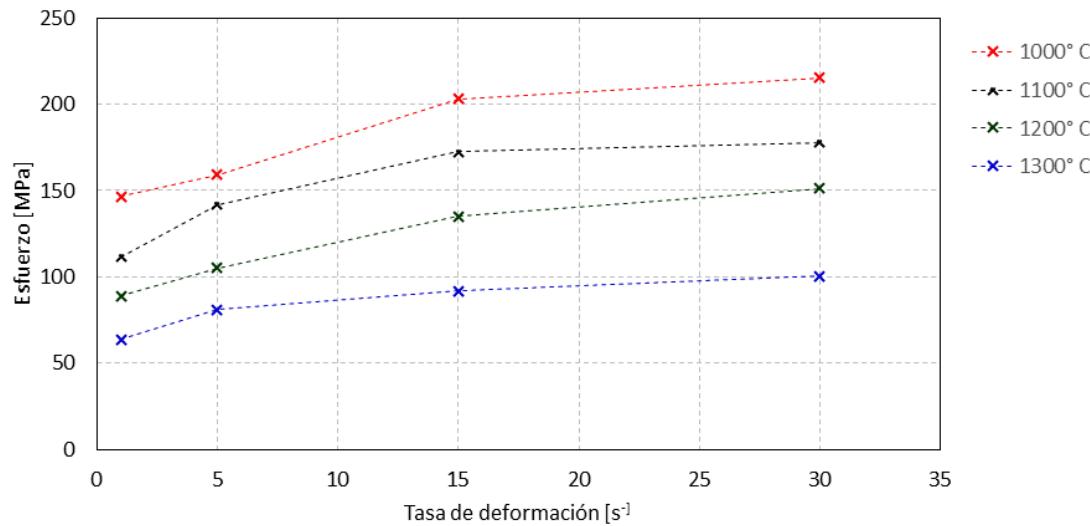


Figura 4.35. Esfuerzo máximo exterior para cada muestra en las condiciones de temperatura y tasa de deformación analizadas con el MEF en el modelo 2D.

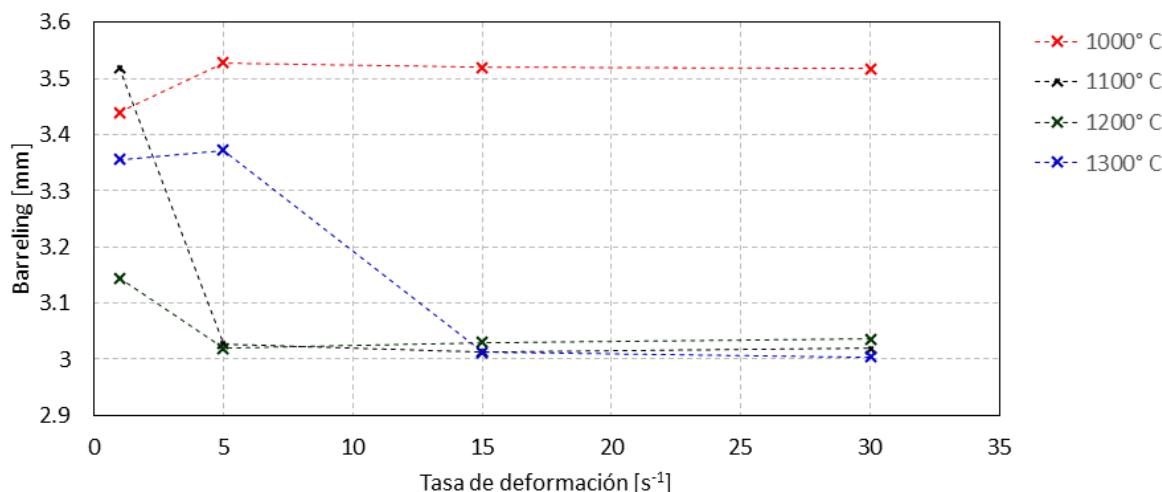


Figura 4.36. Barreling para cada muestra en las condiciones de temperatura y tasa de deformación analizadas con el MEF en el modelo 2D.

4.2. Simulación de probetas 3D

4.2.1. Temperatura 1000°C

4.2.1.1. Tasa de deformación de 1/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 111.4 MPa en la figura 4.37.

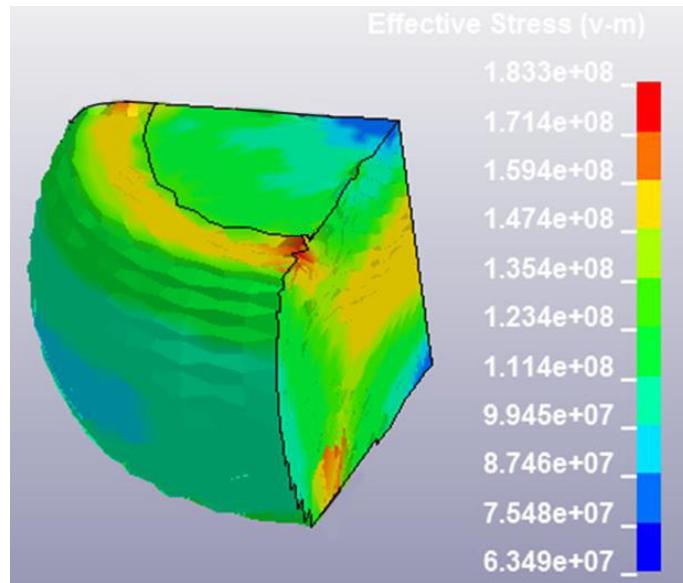


Figura 4.37 Esfuerzos de Von Mises en 1/s a 1000°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.38.

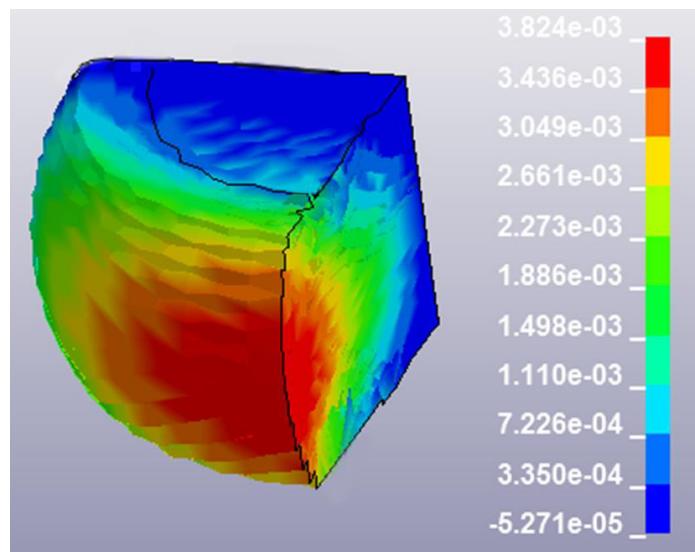


Figura 4.38 Coordenadas en X en 1/s a 1000°C

El valor del barreling es de: 5.428 mm

4.2.1.2. Tasa de deformación de 5/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 151.4 MPa en la figura 4.39.

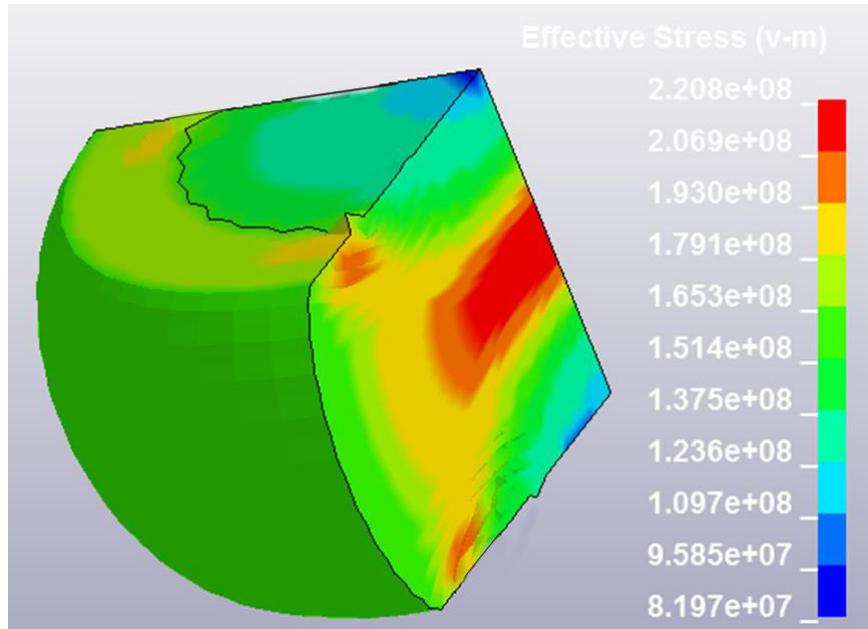


Figura 4.39 Esfuerzos de Von Mises en 5/s a 1000°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.40.

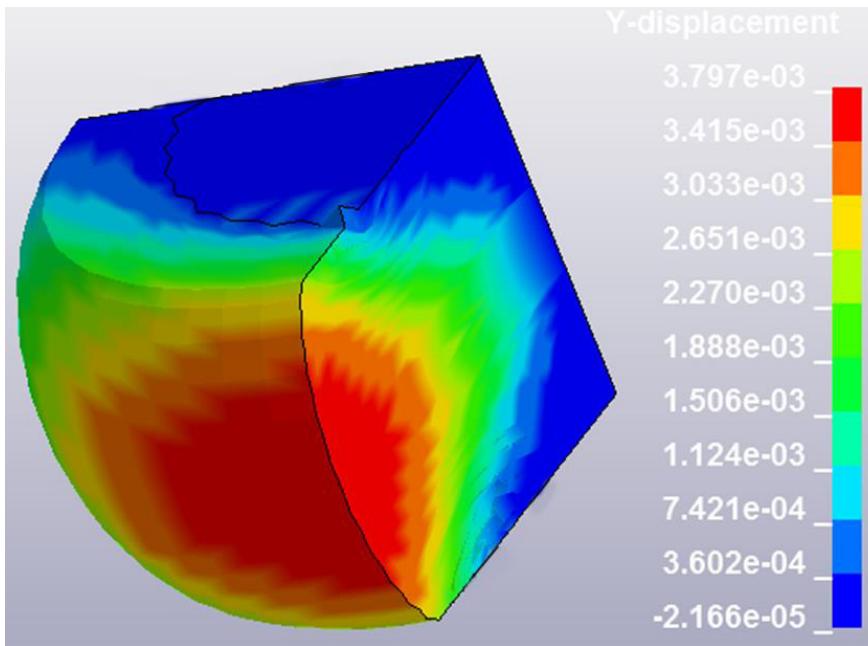


Figura 4.40 Coordenadas en X en 5/s a 1000°C

El valor del barreling es de: 5.346 mm

4.2.1.3. Tasa de deformación de 15/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 196.4 MPa en la figura 4.41.

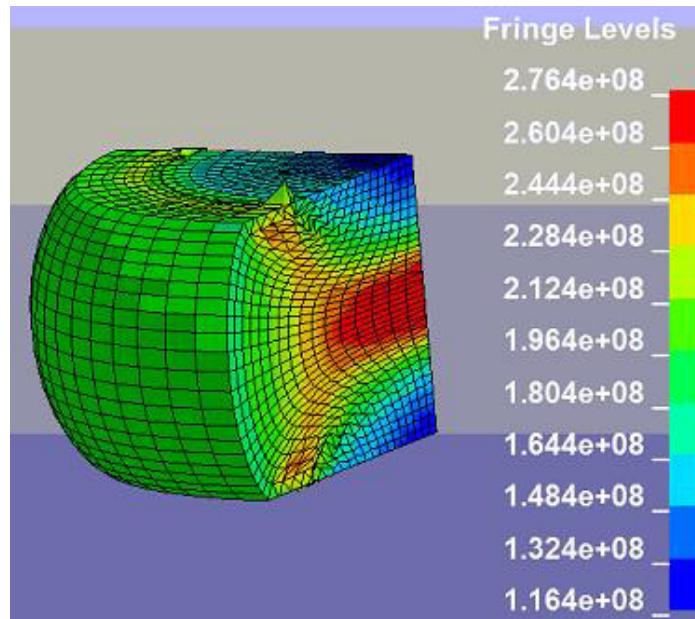


Figura 4.41 Esfuerzos de Von Mises en 15/s a 1000°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.42.

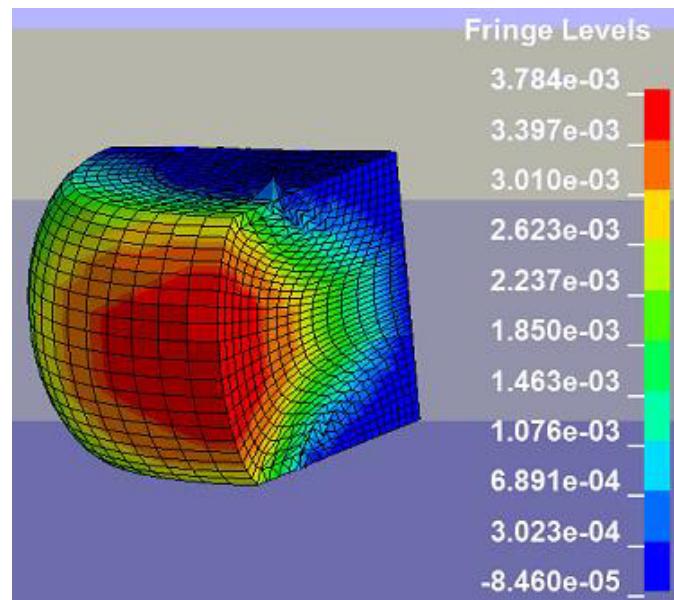


Figura 4.42 Coordenadas en X en 15/s a 1000°C

El valor del barreling es de: 5.416 mm

4.2.1.4. Tasa de deformación de 30/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 112.2 MPa en la figura 4.43.

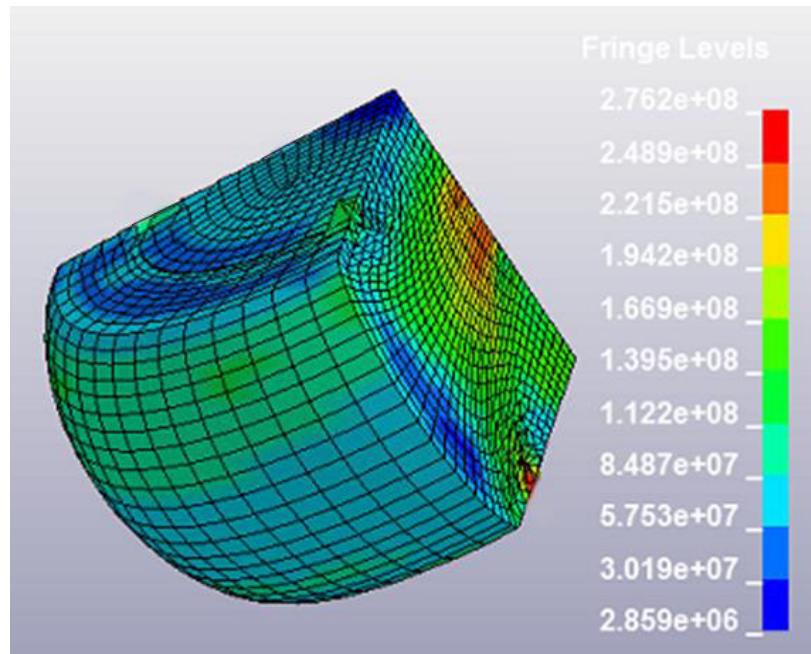


Figura 4.43 Esfuerzos de Von Mises en 30/s a 1000°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.44.

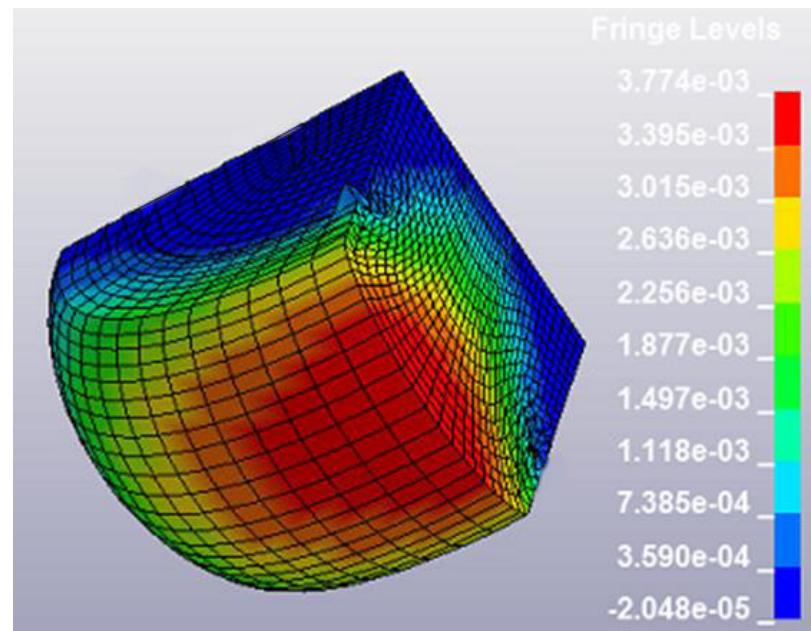


Figura 4.44 Coordenadas en X en 30/s a 1000°C

El valor del barreling es de: 5.312 mm

4.2.2. Temperatura 1100°C

4.2.2.1. Tasa de deformación de 1/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 77.07 MPa en la figura 4.45.

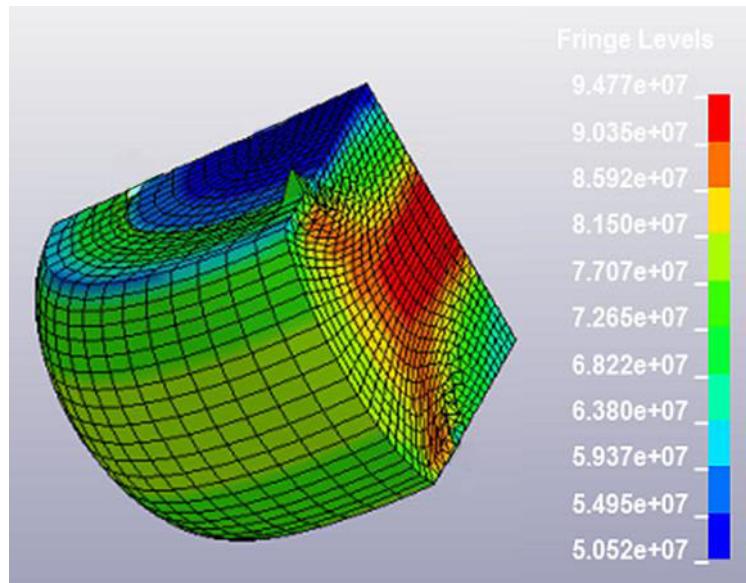


Figura 4.45 Esfuerzos de Von Mises en 1/s a 1100°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.46.

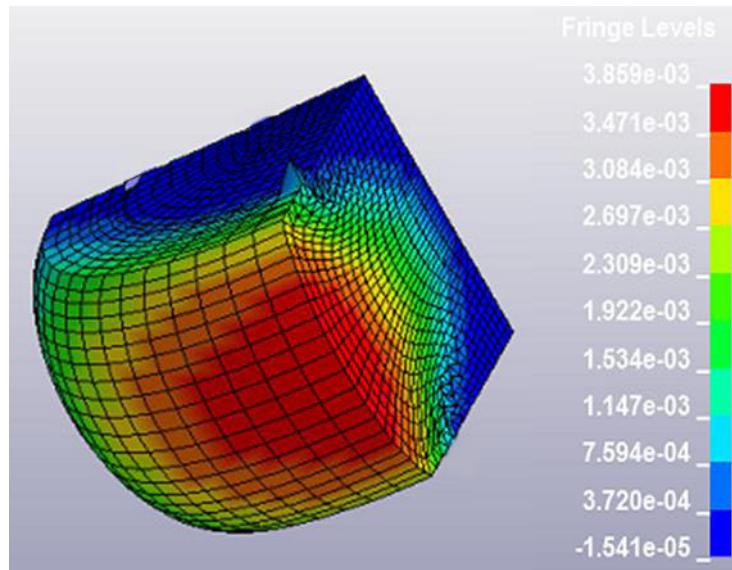


Figura 4.46 Coordenadas en X en 1/s a 1100°C

El valor del barreling es de: 5.424 mm

4.2.2.2. Tasa de deformación de 5/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 117.7 MPa en la figura 4.47.

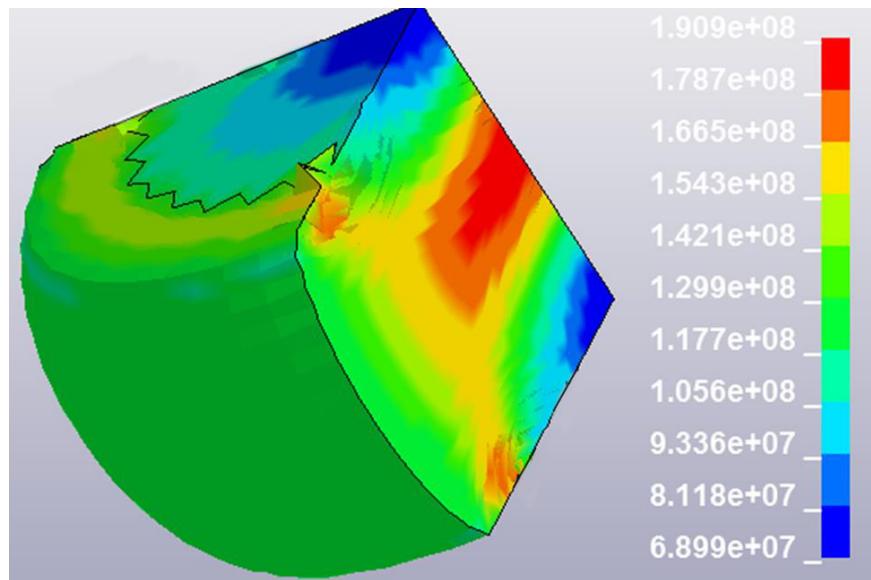


Figura 4.47 Esfuerzos de Von Mises en 5/s a 1100°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.48.

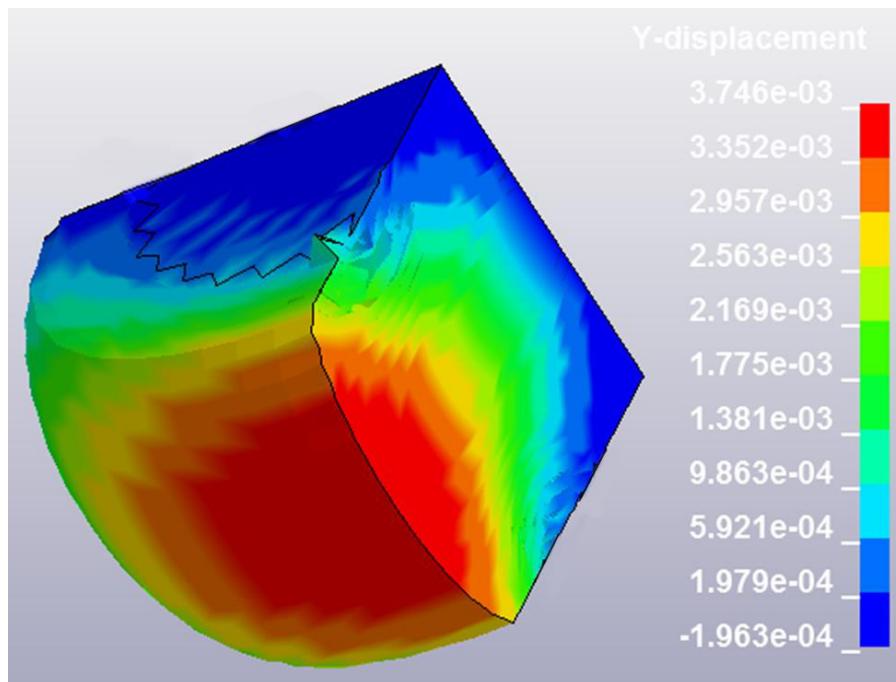


Figura 4.48 Coordenadas en X en 5/s a 1100°C

El valor del barreling es de: 5.52 mm

4.2.2.3. Tasa de deformación de 15/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 147.1 MPa en la figura 4.49.

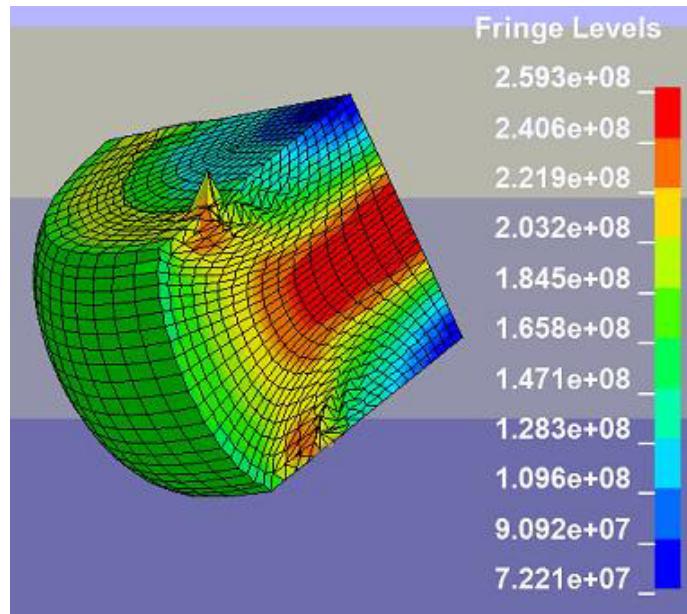


Figura 4.49 Esfuerzos de Von Mises en 15/s a 1100°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.50

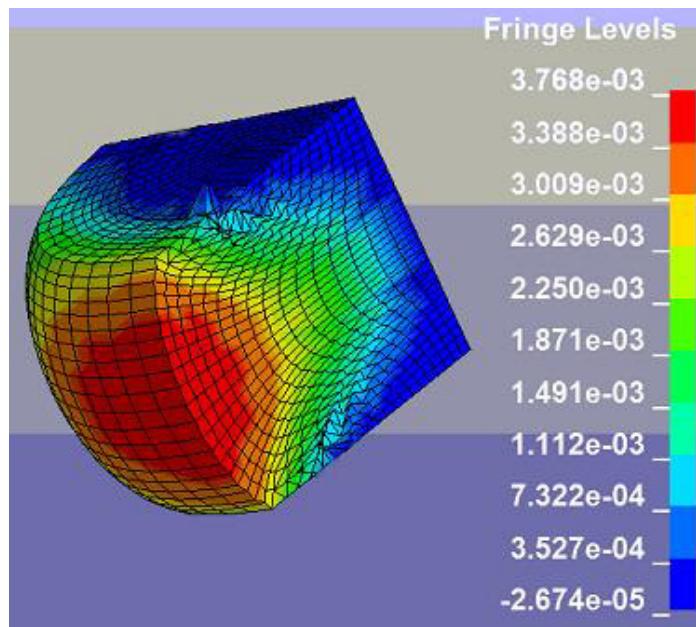


Figura 4.50 Coordenadas en X en 15/s a 1100°C

El valor del barreling es de: 5.312 mm

4.2.2.4. Tasa de deformación de 30/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 164.3 MPa en la figura 4.51.

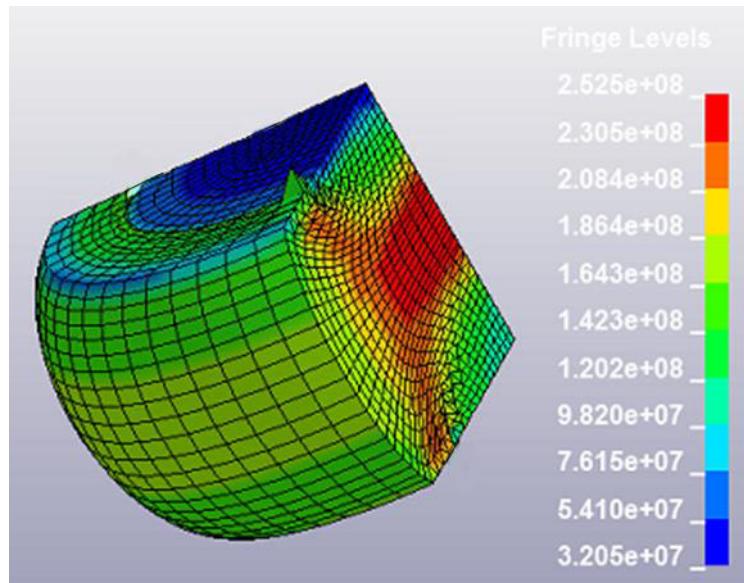


Figura 4.51 Esfuerzos de Von Mises en 30/s a 1100°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.52

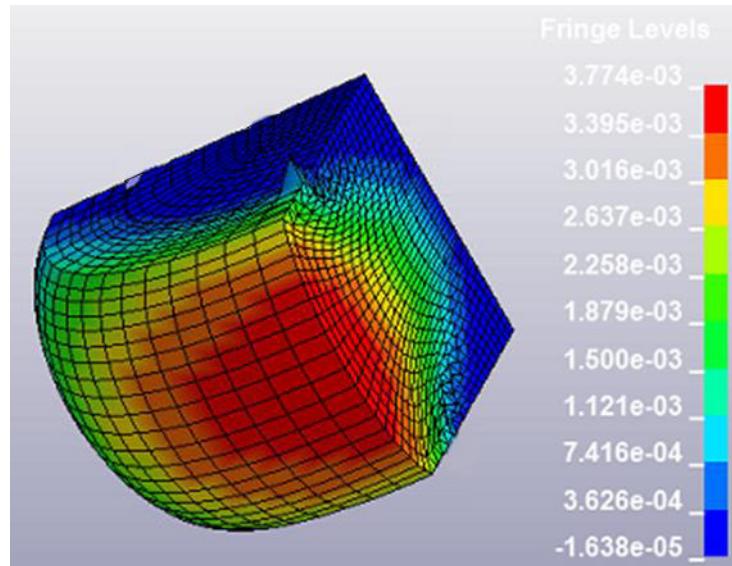


Figura 4.52 Coordenadas en X en 30/s a 1100°C

El valor del barreling es de: 5.306 mm

4.2.3. Temperatura 1200°C

4.2.3.1. Tasa de deformación de 1/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 60.91 MPa en la figura 4.53.

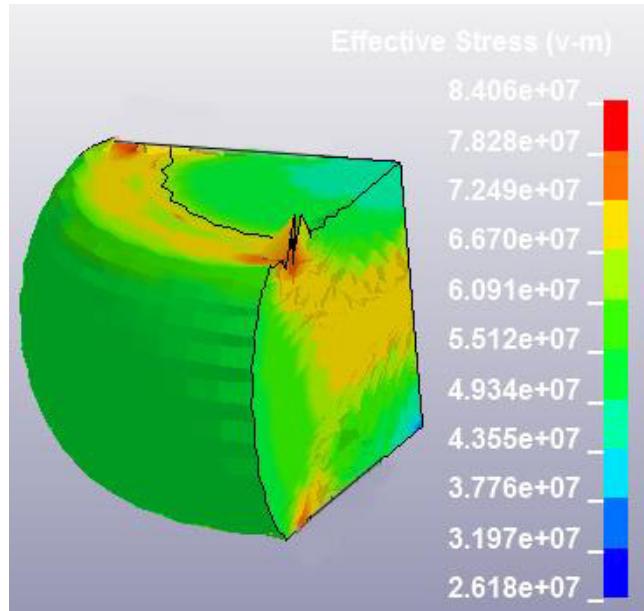


Figura 4.53 Esfuerzos de Von Mises en 1/s a 1200°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.54

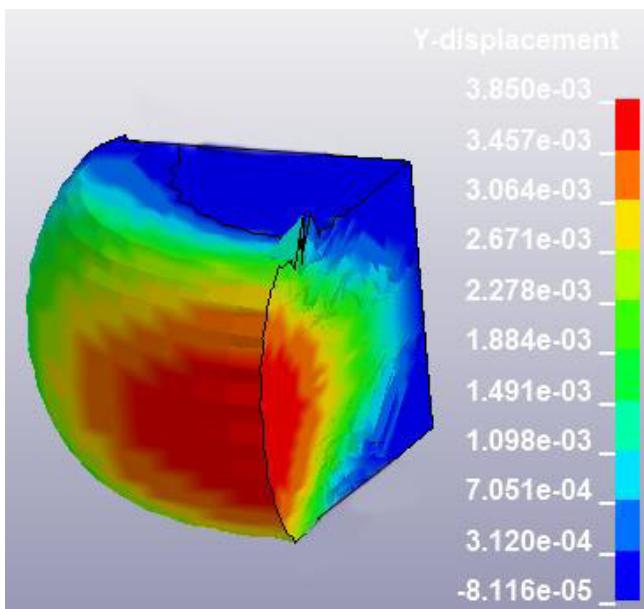


Figura 4.54 Coordenadas en X en 1/s a 1200°C

El valor del barreling es de: 5.504 mm

4.2.3.2. Tasa de deformación de 5/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 97.09 MPa en la figura 4.55.

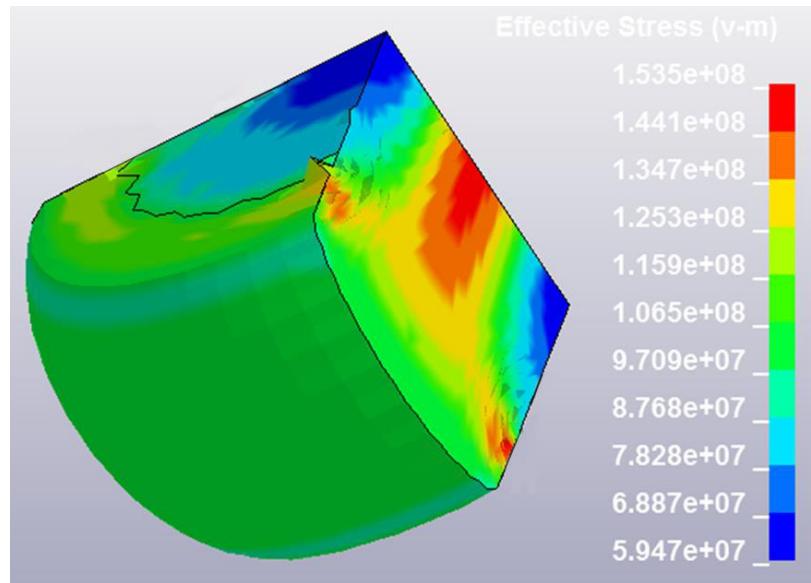


Figura 4.55 Esfuerzos de Von Mises en 5/s a 1200°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.56

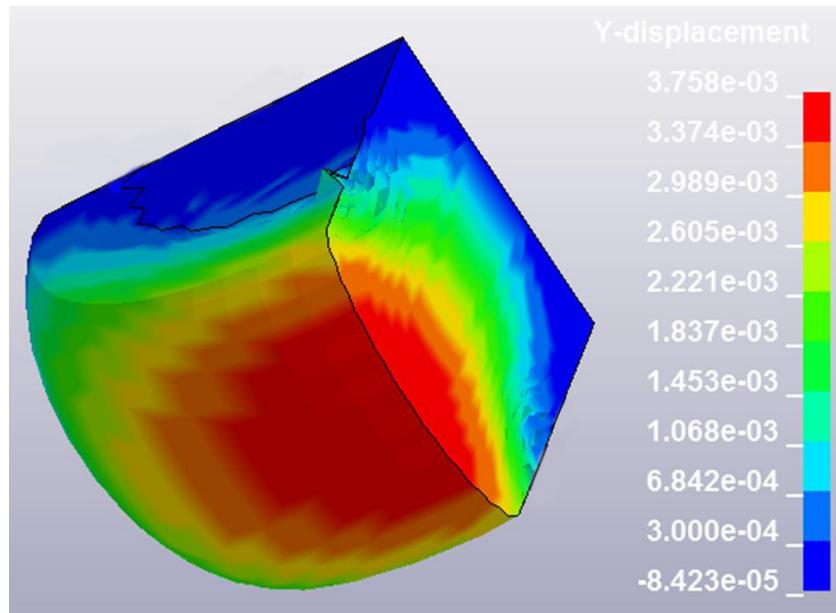


Figura 4.56 Coordenadas en X en 5/s a 1200°C

El valor del barreling es de: 5.38 mm

4.2.3.3. Tasa de deformación de 15/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 129.8 MPa en la figura 4.57.

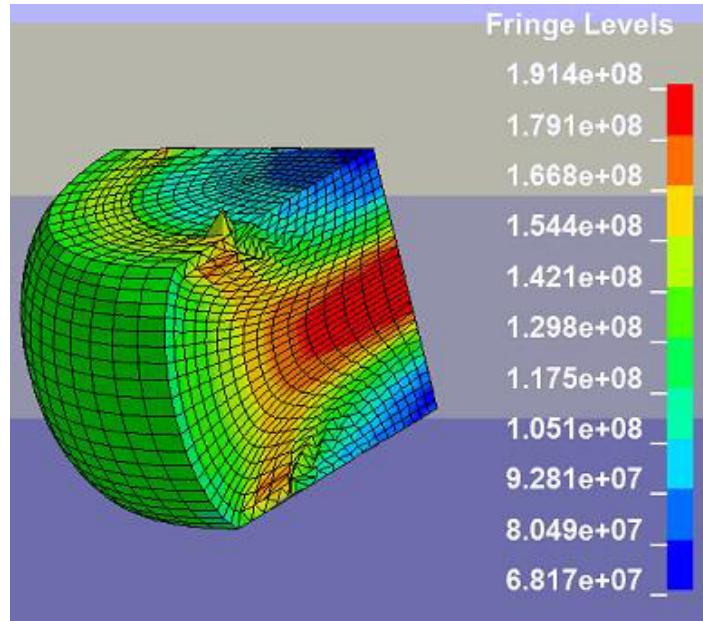


Figura 4.57 Esfuerzos de Von Mises en 15/s a 1200°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.58

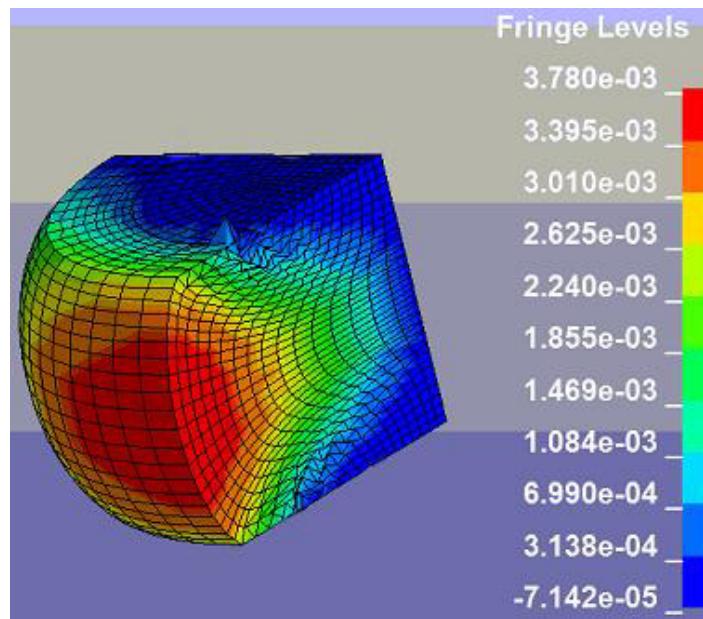


Figura 4.58 Coordenadas en X en 15/s a 1200°C

El valor del barreling es de: 5.392 mm

4.2.3.4. Tasa de deformación de 30/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 135.9 MPa en la figura 4.59.

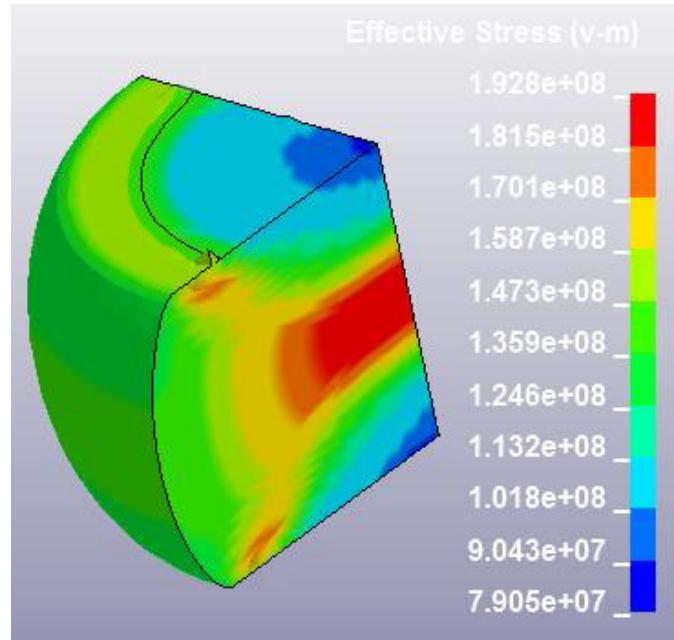


Figura 4.59 Esfuerzos de Von Mises en 30/s a 1200°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.60

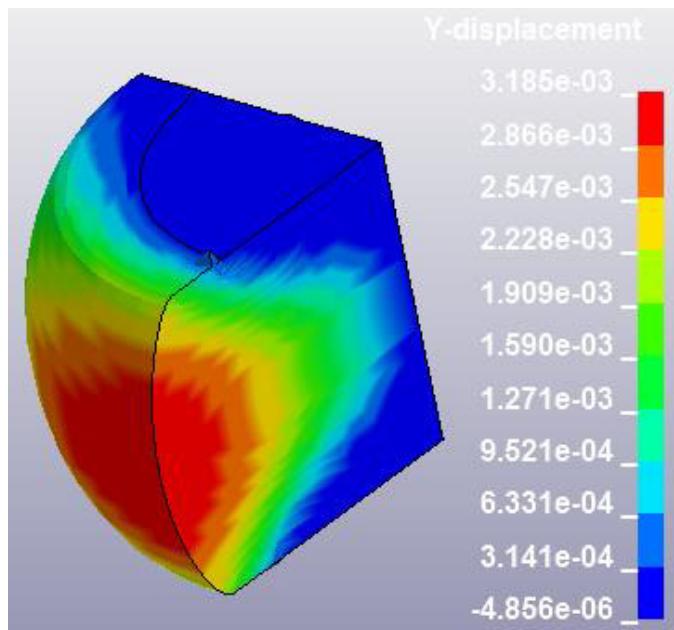


Figura 4.60 Coordenadas en X en 30/s a 1200°C

El valor del barreling es de: 5.104 mm

4.2.4. Temperatura 1300°C

4.2.4.1. Tasa de deformación de 1/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 71.34 MPa en la figura 4.61.

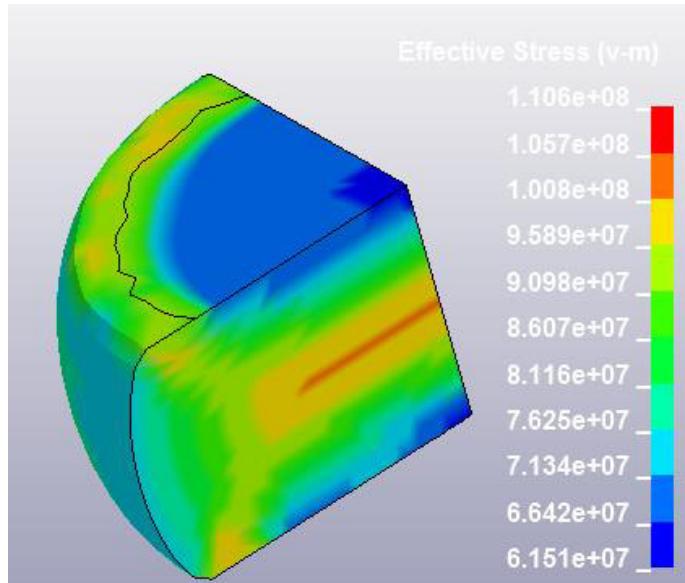


Figura 4.61 Esfuerzos de Von Mises en 1/s a 1300°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.62

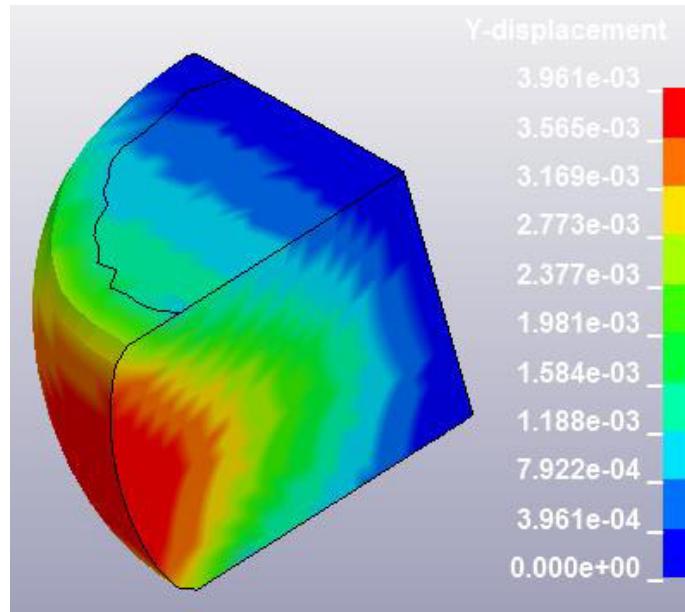


Figura 4.62 Coordenadas en X en 1/s a 1300°C

El valor del barreling es de: 5.54 mm

4.2.4.2. Tasa de deformación de 5/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 71.37 MPa en la figura 4.63.

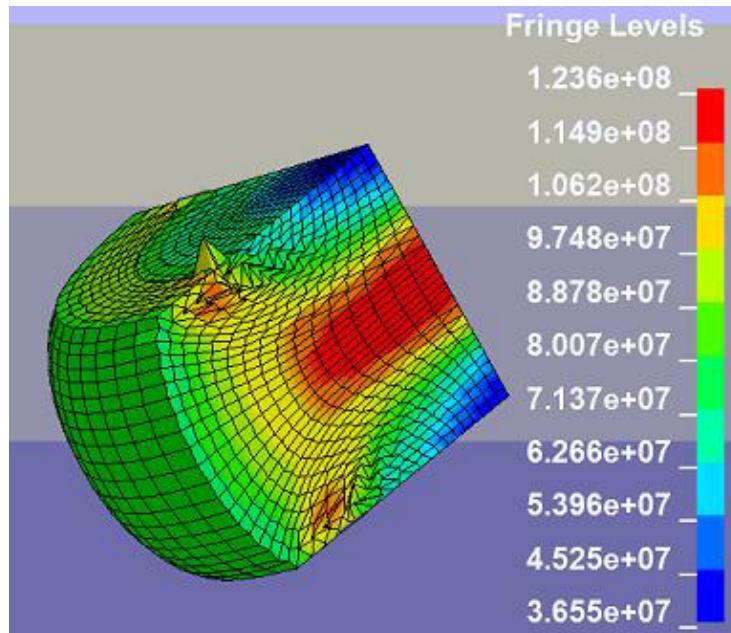


Figura 4.63 Esfuerzos de Von Mises en 5/s a 1300°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.64

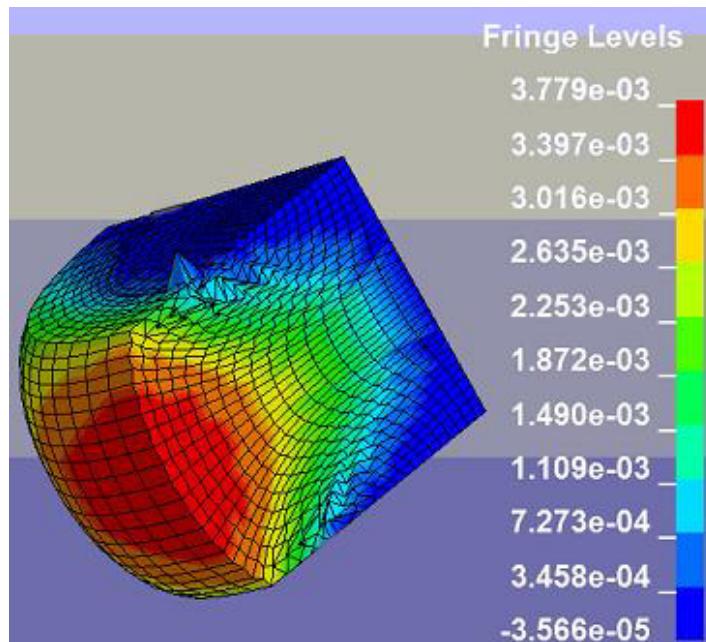


Figura 4.64 Coordenadas en X en 5/s a 1300°C

El valor del barreling es de: 5.34 m

4.2.4.3. Tasa de deformación de 15/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 105.1 MPa en la figura 4.65.

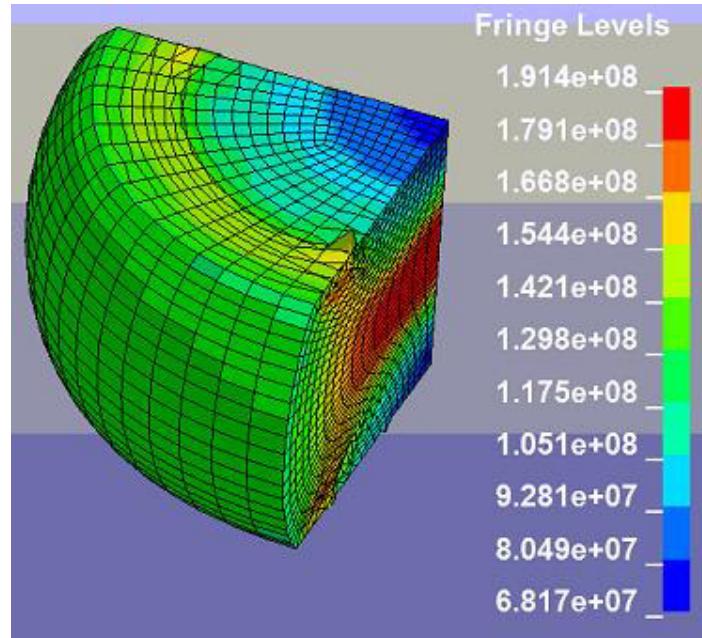


Figura 4.65 Esfuerzos de Von Mises en 15/s a 1300°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.66

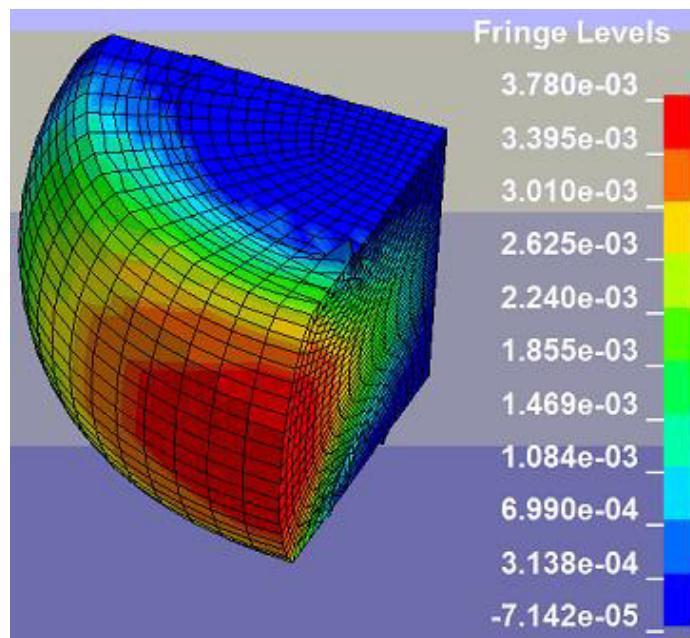


Figura 4.66 Coordenadas en X en 15/s a 1300°C

El valor del barreling es de: 5.392 m

4.2.4.4. Tasa de deformación de 30/s

Puede observarse que el esfuerzo más alto se encuentra en el centro de la probeta. En la parte exterior de la probeta el esfuerzo más alto es de 31.67 MPa en la figura 4.67.

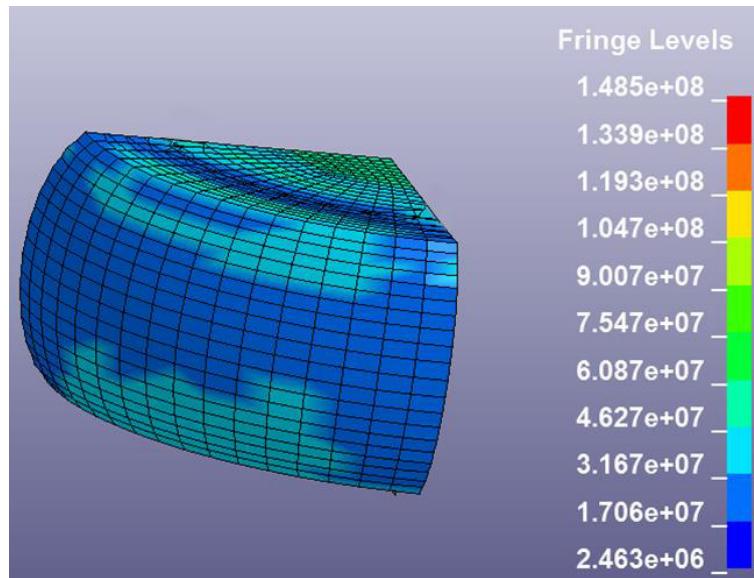


Figura 4.67 Esfuerzos de Von Mises en 30/s a 1300°C

El barreling que tiene la probeta se muestra en la figura 4.68

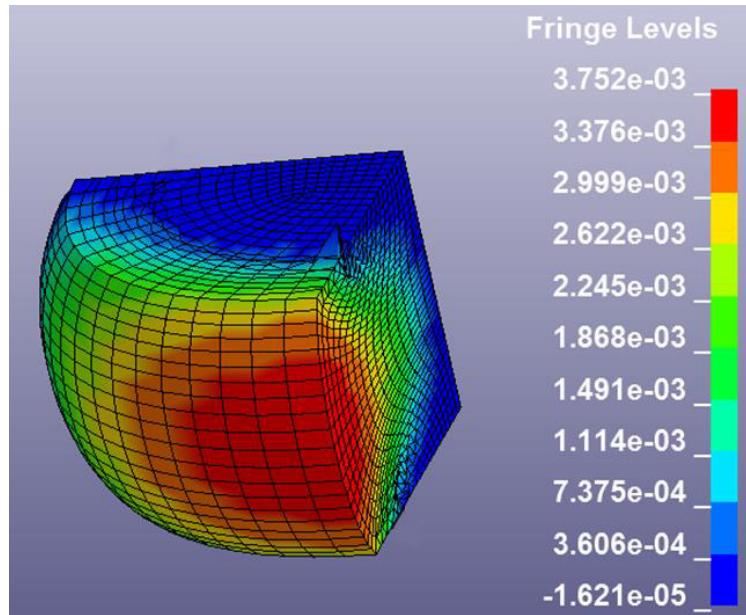


Figura 4.68 Coordenadas en X en 30/s a 1300°C

El valor del barreling es de: 5.276 m

4.2.5. Sumario de resultados 3D

En la tabla 4.2 es mostrada la relación de los esfuerzos máximos en el exterior de la probeta, el esfuerzo en el *folding* y el *barreling* de la probeta.

TABLA 4.2.- Propiedades después de la prueba de compresión en 3D

PRUEBA	Barreling	Esfuerzo max ext [MPa]	Esfuerzo <i>folding</i> [MPa]
1_1000_3D	5.428	114.4	159.4
5_1000_3D	5.346	151.4	193
15_1000_3D	5.416	196.4	244.4
30_1000_3D	5.312	112.2	194.2
1_1100_3D	5.424	77.07	85.92
5_1100_3D	5.52	117.7	166.5
15_1100_3D	5.312	147.1	221.9
30_1100_3D	5.306	164.3	208.4
1_1200_3D	5.504	60.91	72.49
5_1200_3D	5.38	97.09	134.7
15_1200_3D	5.392	129.8	166.8
30_1200_3D	5.104	135.9	170.1
1_1300_3D	5.54	71.34	95.89
5_1300_3D	5.34	71.37	97.48
15_1300_3D	5.392	105.1	142.1
30_1300_3D	5.276	31.67	60.87

Este sumario de resultados de esfuerzo *folding*, esfuerzo exterior y *barreling* se representa de manera gráfica en las figuras 4.69, 4.70 y 4.71 respectivamente.

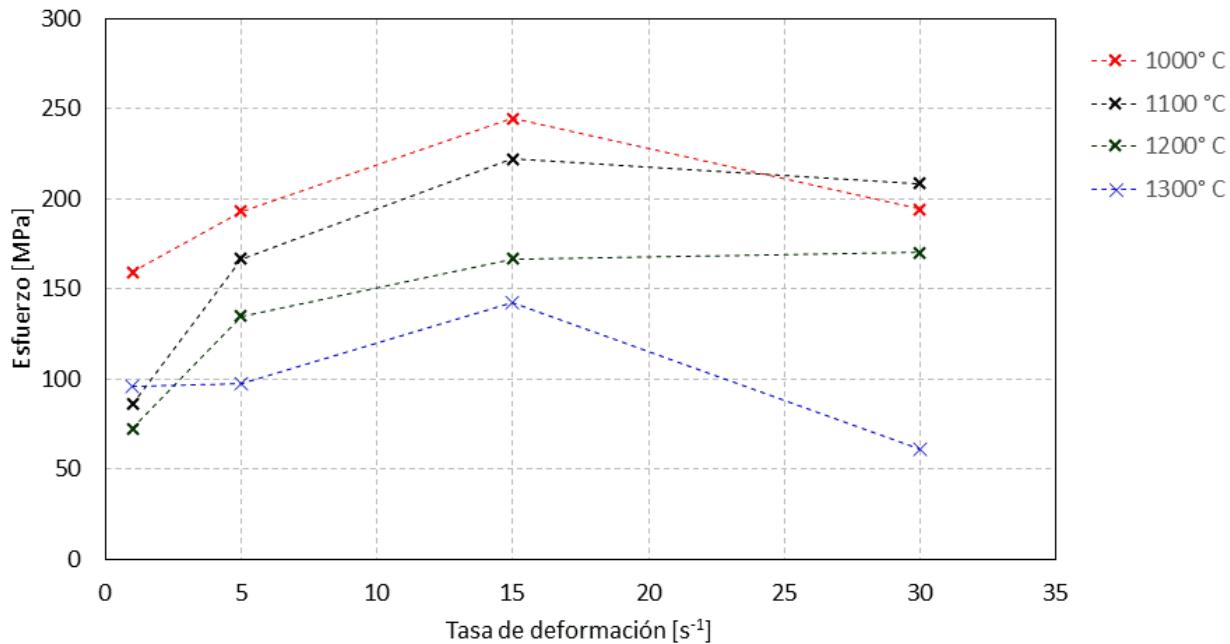


Figura 4.69. Esfuerzo folding para cada muestra en las condiciones de temperatura y tasa de deformación analizadas con el MEF en el modelo 3D.

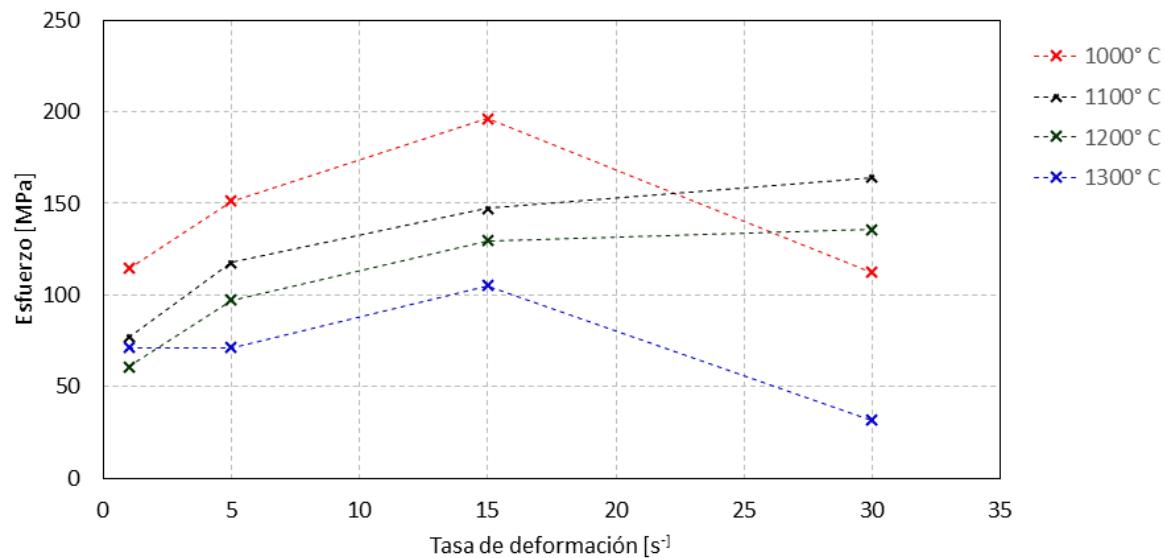


Figura 4.70. Esfuerzo máximo exterior para cada muestra en las condiciones de temperatura y tasa de deformación analizadas con el MEF en el modelo 3D.

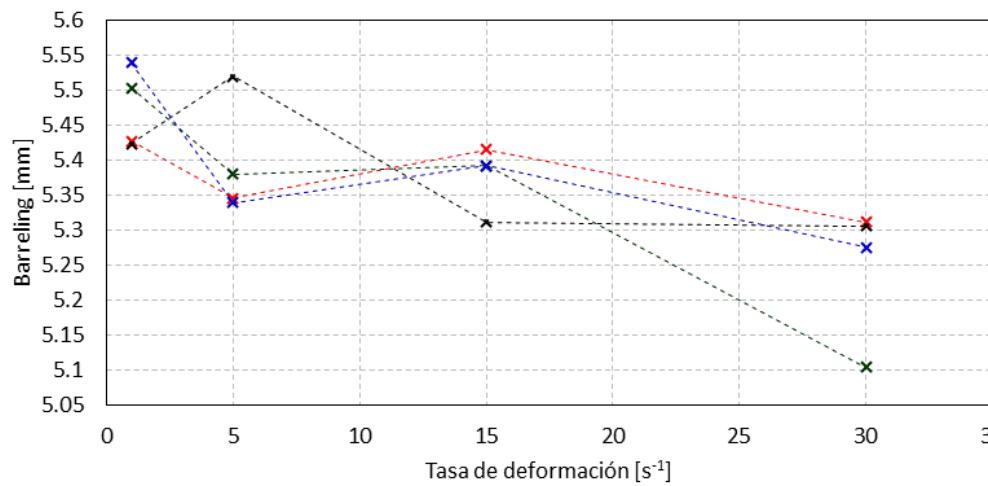


Figura 4.71. Barreling para cada muestra en las condiciones de temperatura y tasa de deformación analizadas con el MEF en el modelo 3D.

FABRICACIÓN Y ENSAMBLE DE COMPONENTES PARA ADAPTACIÓN DE SISTEMA TERMO-MECÁNICO EN PRENSA YL32-100L

5. Fabricación y ensamble de componentes para adaptación de sistema termo-mecánico en prensa YL32-100

5.1. Resumen

En este documento se muestra la manufactura del plastómetro, partiendo del diseño a detalle del sistema para caracterización termo-mecánica de las pruebas de compresión a altas temperaturas.

5.2. Antecedentes de fabricación

En el estudio que fue realizado, existen sistemas para pruebas de compresión, pero al ser costosos y además de que se posee ya una prensa hidráulica en el laboratorio de manufactura de la DICIS, fue realizada la adaptación de un sistema mecánico para las pruebas de compresión isotérmicas a altas temperaturas.

La adaptación térmica, para el calentamiento de las probetas, fue obtenida a través de una empresa tecnológica especializada en equipos de electrónica de potencia y calentamiento por inducción.

5.3 Partes en CAD y partes en físico

Una vez que se ha hecho un diseño a detalle de las partes que componen el sistema, se hace la fabricación para el ensamble del sistema en la prensa hidráulica.



Figura 5.1.- Instalación de la parte mecánica del plastómetro

En la figura 5.2, se hace una comparación de los componentes en el modelo 3D en CAD y los componentes en físico instalados en la prensa.

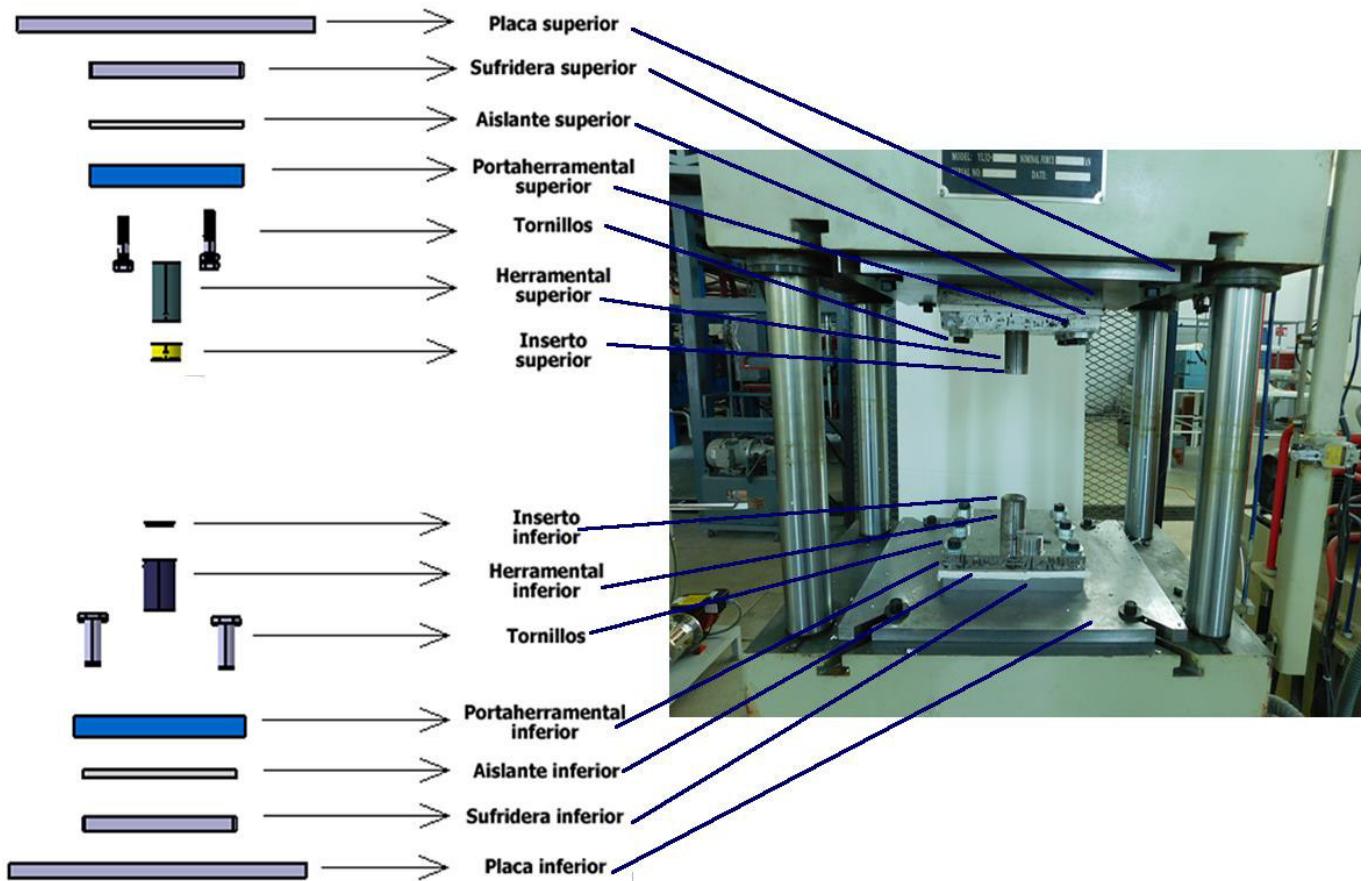


Figura 5.2.- Comparativa de sistema en diseño 3D y físico

El sistema de calentamiento viene en tamaño para la probeta únicamente. El sistema de calentamiento se compone de un sistema de control de potencia de 15KW para la probeta.



Figura 5.3.- Sistema de control de potencia

Para el calentamiento, se tiene un embobinado de cobre, el cual hace que a través de un campo electromagnético se caliente la probeta.

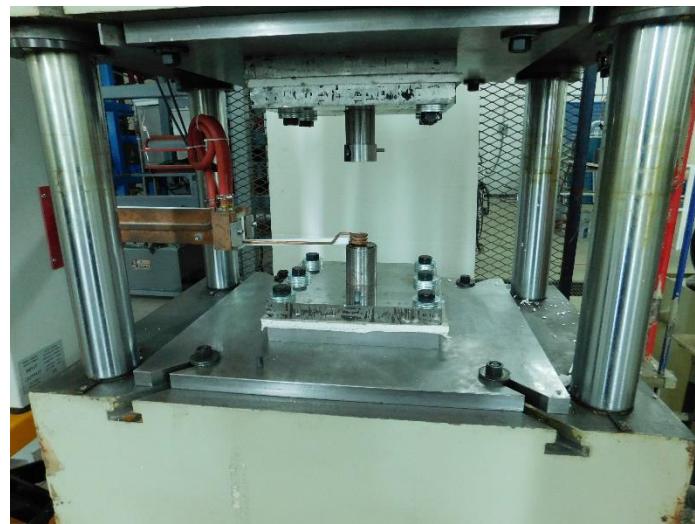


Figura 5.4.- Embobinado para calentamiento de la probeta

5.4 Pruebas de calentamiento de probeta

Una vez que se tiene ensamblado el sistema termo-mecánico, se da inicio a las pruebas de compresión. Las pruebas se realizan con el 20% de la potencia máxima del control, a una frecuencia de 269KHz y una corriente de 59A.



Figura 5.5.- Pantalla de sistema de control

La probeta se coloca sobre el herramiental inferior y se da inicio a la operación de calentamiento.

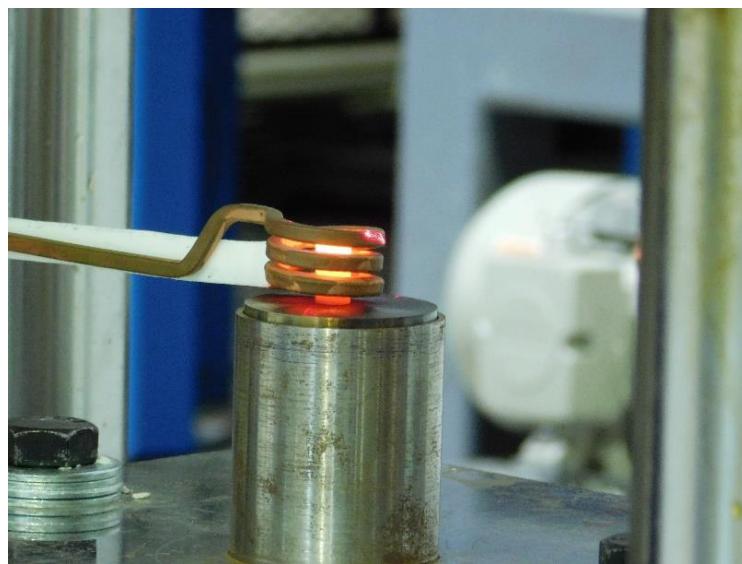


Figura 5.6.- Probeta en el proceso de calentamiento.

Varias pruebas deben hacerse, esto para mostrar la capacidad de calentamiento del sistema. En la figura 5.7 puede observarse que el calentamiento es de la parte exterior de la probeta a la parte interna.



Figura 5.7.- Calentamiento de la parte externa hacia la parte interna de la probeta

La medición de la temperatura de la probeta fue realizada a través de un termómetro laser, el cual es dirigido directamente a la probeta.



Figura 5.8.- Personal de la empresa PEMSA haciendo la medición de la temperatura de la probeta

Debe tenerse especial cuidado con el tiempo y potencia con el cual se hacen las pruebas de calentamiento, debido a que la probeta puede fundirse, como se muestra en la figura 5.9.



Figura 5.9.- Probeta fundida por sobre-exposición al inductor

Tras ocho pruebas, los resultados obtenidos en las pruebas de calentamiento se desglosan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1.- Resultados de pruebas de calentamiento

PRUEBA	POTENCIA	TEMPERATURA [°C]	FRECUENCIA [KHZ]	TIEMPO [S]
1	20%	1230	440	25
2	10%	1017	268	71
3	30%	1236	440	16
4	15%	932	440	41.1
5	15%	898	440	39.4
6	25%	1172	440	21.2
7	30%	1139	440	15.7
8	30%	1214	440	17.6

Para las pruebas contempladas de hasta 1200°C, se requieren menos de 30 segundos para realizarse, por lo que la factibilidad de hacer un número elevado de pruebas al día es total.

En la figura 5.10 pueden ser observadas chispas que salen de la probeta, esto indica que el metal está sufriendo una decarbonización, por lo que una cáscara de material se le forma en la superficie.



Figura 5.10.- Decarbürización de la probeta

Esto tiene como consecuencia que la probeta, al ser calentada más del tiempo previsto y a una alta potencia, pierda carbono, generando una cáscara de material y al momento de hacer la prueba de compresión, pierde material y, por consiguiente, existe una disminución en el abarrillamiento, lo cual genera una medición errónea. Este es un punto de extremo cuidado a controlar.

Fue realizada una prueba de compresión, sin medición de datos de la celda de carga, esto con la finalidad de observar el comportamiento del sistema en compresión. La figura 5.11 muestra una compresión de la probeta, desconociendo la deformación real.

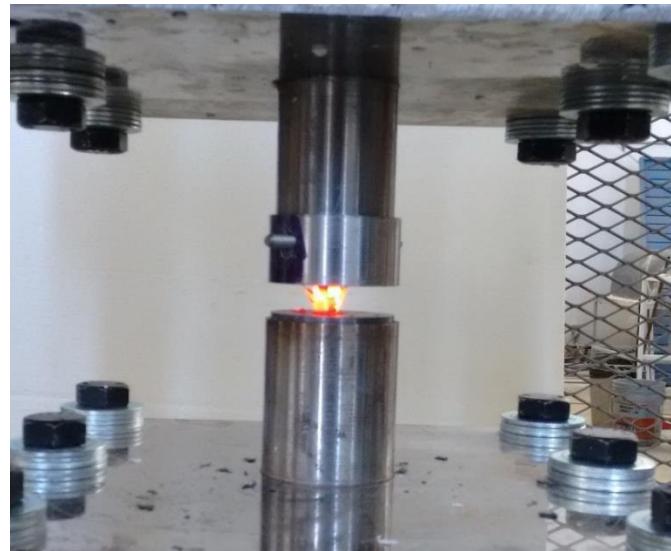


Figura 5.11.- Compresión de probeta

En la figura 5.12 puede observarse la probeta después de la compresión y se observa la cáscara de material que se desprende tras la compresión.



Figura 5.12.- Probeta después de la compresión

CONCLUSIONES

6. Conclusiones

El conocimiento de los conceptos básicos relacionado con la forja será esencial para el desarrollo del proyecto PEI, con el que actualmente la Universidad de Guanajuato trabaja en conjunto con la UEAH y la empresa PEMSA. Dadas a las características que proporciona el proceso forjado, fue de interés para desarrollar una tecnología que no se encuentra en el país, ya que, al obtener un producto final por proceso de forja, éste requiere únicamente un proceso de rectificado, siendo este un proceso en el cual el material desbastado no es significativo en comparación al material desbastado en el proceso de fabricación por Centro de Maquinado.

Fue lograda la aplicación de la metodología de las pruebas de compresión a altas temperaturas, esto para el diseño y fabricación del prototipo para la caracterización de los metales a compresión y altas temperaturas. El prototipo, Figura 5.4, servirá para dar servicio a la industria, no quedándose solamente a las condiciones de trabajo en un laboratorio, por lo que debe existir una resolución amplia en las tasas de deformación. La prensa hidráulica sobre la cual fue montado el prototipo, se encuentra instrumentada con los dispositivos adecuados para la obtención de las curvas de flujo.

Debido a que no existe una metodología normalizada por alguna asociación, deben suponerse algunos parámetros de las dimensiones de las probetas, como son el tipo de probeta a utilizarse y el diámetro de las probetas de anillo para las pruebas de factor de fricción.

Los parámetros por los cuales se harán las pruebas, se encuentran limitados por el equipo que se tiene. La prensa en el Laboratorio da el parámetro de la tasa de deformación, por lo que deberá caracterizarse a la tasa de deformación que pueda realizarse. Solamente se podrá obtener una gráfica por cada temperatura.

La temperatura es un valor que debe controlarse a través del sistema eléctrico del embobinado de calentamiento, en el cual se debe hacer un análisis con termopares para

tomar el tiempo de calentamiento de la probeta a la temperatura deseada de caracterización. Deben hacerse pruebas con termopares en las probetas antes de obtener las curvas finales, esto con la finalidad de caracterizar el calentamiento de la probeta. Las pruebas de compresión se efectuarán en un inicio con los termopares, con la finalidad de generar una función de temperatura de la probeta a través del tiempo de la prueba de compresión, con la finalidad de hacer un control PID con retroalimentación para lograr una prueba de compresión isotérmica. Con esto se logra tener una prueba isotérmica y así no existiría enfriamiento del material.

El control de la temperatura debe hacerse primero con un espécimen y tres termopares soldados en parte superior, del contorno e inferior; se comprime y se mide la variación de la temperatura. La tolerancia de la temperatura es de $\pm 5^{\circ}\text{C}$, esto para satisfacer las propiedades isotérmicas. El sistema debe estar completamente aislado para evitar daños en los equipos electrónicos, por lo que el sistema que se obtuvo se encuentra aislado.

El control de la temperatura se hace primero con un espécimen y un termopar soldado en parte del contorno, se comprime y se mide la variación de la temperatura. El termopar que se usará será de tipo K, ya que tiene un rango de hasta 1372°C y su costo es bajo. Al no ser magnéticos, no se verían influidos por el campo generado por el dispositivo de calentamiento.

El dispositivo no se va a encontrar en vacío en el interior del volumen de prueba, esto debido al costo que generaría extra para su fabricación. La decarbonización de la probeta será un punto que no se tomará en cuenta. El pozo térmico para que la celda de carga no falle no es necesario, esto gracias a la colocación de la celda de carga arriba de la platina. Con este punto, nuestro sistema tiene un ahorro significativo, además de que el tiempo para la fabricación se disminuye en gran parte.

El material que debe ser usado en los herramientales debe tener las siguientes dos propiedades: no ser un material ferromagnético para evitar su calentamiento por

campo magnético, solamente por inducción; ser un material con alto punto de fusión, esto para que cuando se haga la prueba de compresión no se deforme el herramental y se tenga que cambiar por cada prueba. El herramental tiene insertos, estos de un material H13, que tiene mayor punto de fusión y mayor resistencia. Fue propuesto que sean intercambiables para que al desgastarse solamente se cambie una pieza y no todo el herramental.

Finalmente, se lograron hacer pruebas experimentales para la compresión de cilindros, únicamente de manera funcional, para poder corroborar que las probetas realmente se comprimen.

TRABAJO A FUTURO

7. Trabajo a futuro

El siguiente capítulo habla acerca de los trabajos a futuros que posee el área de las pruebas de compresión, debido a que poco existe en la bibliografía acerca de las fallas posibles para las pruebas.

Actualmente existen muchas teorías de fallas para probetas a tensión uniaxial, pero no hay estudios que se involucren en las probetas a compresión uniaxial, por lo que es una amplia área de investigación. Aunque en las simulaciones de elemento finito son muy apegadas a la realidad, cuando se hacen con las condiciones adecuadas, es necesario hacer pruebas de manera experimental, esto debido a que hay valores necesarios para la simulación.

La principal área de trabajo a futuro es la búsqueda a fondo de teorías de falla en materiales a altas temperaturas, esto puede ser en la fractura dúctil, la cual ocurre después de una deformación plástica considerable, además de requerir una zona de propagación de su flujo. Estas fallas no dependen solamente del material, como es la composición química, microestructural, condiciones de la superficie y homogeneidad, también depende de los parámetros descritos en el capítulo 1, los cuales son la tasa de deformación, lubricación, fricción, temperatura y el grado de deformación.

Dentro de las pruebas vistas en TU Freiberg, existe una falla de una probeta por cada cinco pruebas realizadas, puede ser tanto de fractura en la probeta como en el herramiental, debido a que usan un herramiental cerámico. La razón fundamental por la cual usan el herramiental cerámico es debido a que si no se conocen las propiedades mecánicas, o se tiene un aproximado de cuál será su curva de flujo, es mejor romper un herramiental de bajo costo a romper uno de alto costo.

Un método para representar la fractura dúctil de un material es a través de la ecuación 6.1 [11].

$$\int f(\text{deformación}) d\bar{\varepsilon} = C$$

Donde:

$\bar{\varepsilon}$ = Deformación efectiva

C= Valor crítico de daño

Cuando el valor máximo de daño (VMD) del material excede el valor critico de daño (VCD), puede suponerse la creación de una grieta y por lo tanto la falla de la probeta.

Dentro de los criterios de fractura se encuentran [11]:

Freudenthal (1950): $\int^{\bar{\varepsilon}_1} \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} = C_1$

Cockcroft & Latham (1968): $\int^{\bar{\varepsilon}} \frac{\bar{\sigma}}{\sigma} d\bar{\varepsilon} = C_2$

McClintock (1968): $\int^{\bar{\varepsilon}} \left[\frac{2}{\sqrt{3}(1-n)} \sinh \left\{ \frac{\sqrt{3}(1-n)(\sigma_b - \sigma_a)}{2\bar{\sigma}} \right\} + \frac{(\sigma_b - \sigma_a)}{\bar{\sigma}} \right] d\bar{\varepsilon} = C_3$

Donde:

σ_a = Esfuerzo principal máximo

σ_b = Esfuerzo principal mínimo

n= constante de endurecimiento por deformación

Es por ello que existe mucha área de investigación. El encontrar ciertos criterios, facilita para el análisis a futuro de las simulaciones y así considerar un análisis tribológico que permita determinar el mejor lubricante para cada uno de los materiales a analizar en un futuro.

Además, buscar la creación de un modelo paramétrico de las probetas, junto con el coeficiente de fricción y buscar la optimización de las variables para determinar una probeta que tenga un mejor desempeño que las actuales.

Es posible que exista una optimización de la forma de las probetas para la obtención de una tasa de deformación uniforme, cuando la velocidad de la prensa es constante, como podría ser que la probeta no fuera cilíndrica, o que las paredes laterales no fueran rectas; la finalidad de esta optimización es para alguien que desea obtener las curvas de flujo sin tener que instrumentar la prensa con una válvula proporcional.

BIBLIOGRAFIA

8. Bibliografía

- [1] Totten, G., Funatani, K. (2004) Handbook of Metallurgical Process Design. Marcel Dekker, INC.
- [2] Altan, T., Ngaile, G., Shen, G. (2004) Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications. ASM International
- [3] Schuler, G. (1998) Metal Forming Handbook. Springer.
- [4] J. T. Black, Ronald A. Kohser (2007) Materials & Processes in Manufacturing. Wiley, 10th Edition
- [5] Kozo Osakada (2010) History of plasticity and metal forming analysis. Journal of materials processing technology
- [6] Groover, M. (2007) Fundamentals of Modern Manufacturing.
- [7] Black, J., Kohser, R. (2008) Materials & Processes in Manufacturing.
- [8] Needleman, A., (1970). “Void Growth in an Elastic-Plastic Medium” Ph.D. Thesis, Harvard University.
- [9] Kobayashi, S., Oh, S., Altan, T. (1989) “Metal Forming and the Finite-Element Method” Oxford University Press.
- [10] Gandy, D. (2007) Carbon Steel Handbook.
- [11] Wang, J. Ngaile, G., Acosta, C. (2014) Curso: Fundamentos de Procesos de Forja.
- [12] Vorburger, T., Raja, J. (1990) Surface finish metrology tutorial
- [13] T. Z. Blaziynski (1985) Design of tools for deformation process. Elsevier applied science publishers
- [14] Douglas, J.R., Altan, T. “Flow Stress Determination for Metals at Forging Rates and Temperatures” (1975) Journal of Engineering for Industry, pp 66-76
- [15] Jacobo, L., Garnica, P., Hurtado, E. “Estudio del estado de deformación en aluminio con ensayos de compresión en caliente por el método de elemento finito”
- [16] <http://gleeble.com/products/gleeble-3800.html>
- [17] <http://msmm.atilim.edu.tr/mekanik-karakterizasyon-olanaklari>
- [18] Altan, T. Research and Development in Forging at ERC/NSM – Presentation.
- [19] Forging Lab Presentation – OSU (2008)
- [20] <http://www.mae.ncsu.edu/ngaile/>
- [21] Ring Compression Test. ERC for Net Shape Manufacturing.

- [22] Semiatin, S. L., Altan, T. (2010) Measurement and interpretation of flow stress data for the simulation of metal-forming processes. Air Force Research Laboratory.
- [23] Dieter, G.E., Kuhn, H. A., Semiatin, S. L. (2003). Workability and process design. ASM International.
- [24] Altan, T. (2004) Flow Stress Determination. ASM International.
- [25] <http://nsm.eng.ohio-state.edu/>
- [26] <http://www.instron.com/en-us/our-company/about-us/our-history>
- [27] Nordine, P. (2002) Glass fiber having compositions of alumina-lanthana and made from undercooled molten materials. US 6484539 B1
- [28] <http://www.zircaceramics.com/products.htm>
- [29] Ashby, Michael F. (2005) Materials Selection in Mechanical Design. Elsevier
- [30] Nonlinear Structural – Chapter 2. (2005) ANSYS Training Manual
- [31] ANSYS (n.d.) Help Version 15.0
- [32] http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_773.html
- [33] Everett, F. L., Miklowitz, J. (1944) Poisson's Ratio at High Temperatures. Journal of Applied Physics.
- [34] <http://www-ferp.ucsd.edu/LIB/PROPS/PANOS/moa.html>
- [35] Sin autor. Methods & Study Collective – Definitions of Velocity, displacement, strain and strain rate.